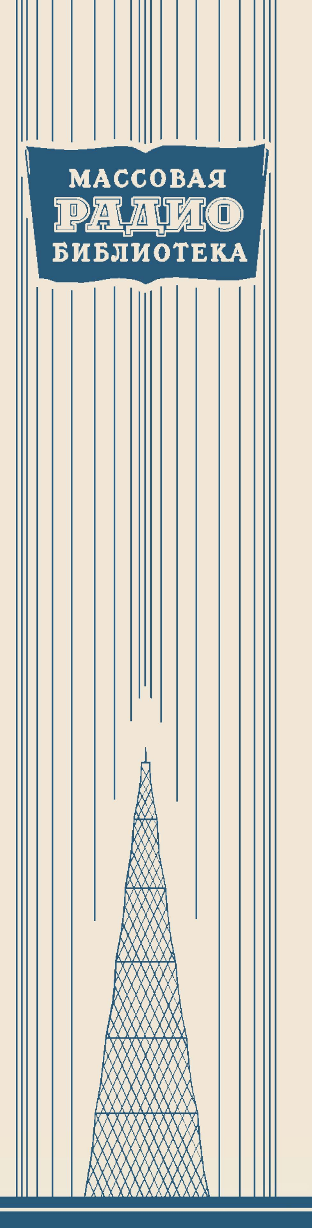
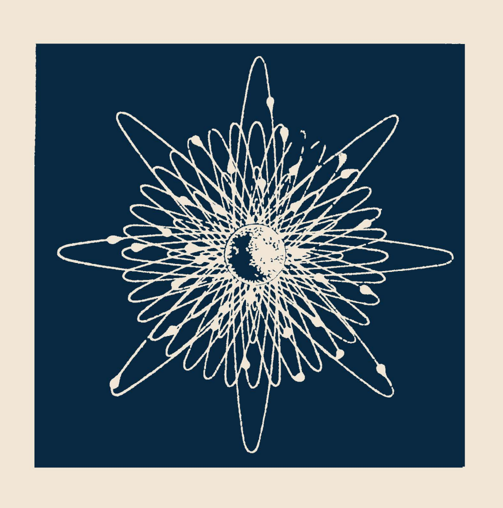


М. С. СОМИНСКИЙ

ПОЛУПРОВОДНИКИ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ



ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

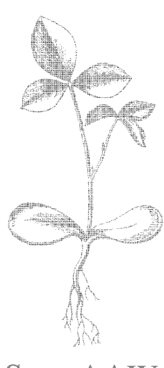
1956

МАССОВАЯ РАДИОБИБЛИОТЕКА

Выпуск 236

М. С. СОМИНСКИЙ

ПОЛУПРОВОДНИКИ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ





ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО

МОСКВА 1955 ЛЕНИНГРАД

В книге изложены основные свойства полупроводников, устройство и работа полупроводниковых диодов, триодов, фотосопротивлений, фотоэлементов, термосопротивлений и примеры их применений.

Книга предназначена для подготовленных радиолюбителей.

Автор *Соминский Монус Самуилович*
ПОЛУПРОВОДНИКИ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ

Редактор *А. М. Бройде* Техн. редактор *Г. Е. Ларионов*

Сдано в пр-во 2/IX 1955 г. Подписано к печати 24/XI 1955 г.
Бумага 84×108 1/32 Печатн. л. 6,56 Уч.-изд. л 7,6
Т-09537 Тираж 50 000 Цена 3 р. 05 к. Зак № 423

Типография Госэнергоиздата. Москва, Шлюзовая наб., 10.

ВВЕДЕНИЕ

С каждым годом полупроводники приобретают все большее значение в науке, технике и народном хозяйстве. В настоящее время, пожалуй, не существует ни одной области техники, в которой не использовались бы полупроводники.

Применение полупроводников позволило осуществить решение таких проблем, которые раньше, с помощью старых технических средств, не могли быть разрешены. С другой стороны, всестороннее изучение полупроводников помогло построить единую электронную теорию твердых тел, помогло понять и установить ряд общих закономерностей. По меткому выражению академика А. Ф. Иоффе, «полупроводники — это почти весь окружающий нас неорганический мир». Действительно, к классу полупроводников относится большинство окислов металлов и их сернистых соединений, некоторые селениды и ряд бинарных сплавов металлов. Такие вещества, как графит, селен, германий, кремний, теллур, также являются полупроводниками. Многие двойные сплавы металлов проявляют явные полупроводниковые свойства.

На основе использования полупроводников сконструированы и построены десятки типов приборов, выполняющих широкие и разнообразные функции. При посредстве полупроводниковых устройств осуществляется преобразование переменного тока в постоянный, обеспечивается защита электрических линий от перенапряжений, трансформируется свет одного спектрального состава в другой, решается задача непосредственного превращения тепловой энергии в электрическую, осуществляется усиление электрических колебаний, «вырабатывается» холод в специальных холодильниках, производится автоматический счет ядерных частиц, становится возможным превращение акустической энергии в электрическую.

Некоторые полупроводниковые соединения являются прекрасными катализаторами и с успехом применяются в ряде химических производств.

Полупроводниковые фотоэлементы, фотосопротивления, термоэлектрогенераторы, тензометры, термисторы, выпрямители, диоды и триоды, люминофоры и другие полупроводниковые приборы и материалы заслуженно получили широкое признание и всестороннее распространение.

Неограниченные возможности, которые таят в себе полупроводники, привлекли к ним внимание физиков и техников. Ведущиеся на протяжении всего лишь около 25 лет интенсивные научно-исследовательские работы в области физики полупроводников уже принесли как для теории, так и для практики серьезные результаты. Особенно значительные сдвиги в области практического использования полупроводников произошли в послевоенные годы. В течение последних 10 лет были заметно усовершенствованы уже существовавшие полупроводниковые приборы, изобретены новые и значительно расширены области их применений.

Что же такое полупроводники и что их отличает от металлов и изоляторов? Ответ на этот вопрос не может быть кратким и простым. Для того чтобы понять физическую сущность этого класса веществ, необходимо предварительно хотя бы в самой сжатой форме ознакомиться с основными положениями теории полупроводников. Эти сведения, необходимые для понимания всего последующего материала, излагаются в первой главе. Все остальные главы посвящены описанию полупроводниковых приборов и материалов и их технических применений.

Нельзя не отметить, что ценный вклад в изучение полупроводников внесли советские ученые.

Многочисленный отряд советских физиков интенсивно работает над дальнейшим углублением и расширением этой сравнительно молодой области физики. «Темпы развития учения о полупроводниках и их применений, — говорит академик А. Ф. Иоффе, — ясно показывают, что мы находимся еще в начальной стадии далекого пути, который должен поднять энергетику, автоматику, радиотехнику, измерительную и осветительную технику на гораздо более высокий уровень. Полупроводники — одна из передовых и наиболее прогрессивных областей физики и техники нашего времени».

ГЛАВА ПЕРВАЯ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛУПРОВОДНИКОВ

КРИСТАЛЛИЧЕСКАЯ РЕШЕТКА

В 1895 г. Вильгельм Конрад Рентген открыл лучи, впоследствии названные его именем. Это выдающееся открытие дало в руки ученым могущественное орудие исследования природы, позволившее заглянуть далеко вглубь строения вещества и раскрыть структуру кристаллов.

Еще в конце восемнадцатого века была высказана гипотеза, пытавшаяся обосновать существование в природе великого многообразия кристаллических тел, но никаких надежных опытных подтверждений эта гипотеза не имела. Положение резко изменилось лишь в 1912 г., когда два молодых физика Фридрих и Книппинг поставили опыт, выяснивший природу рентгеновских лучей. Тот же опыт показал, что при помощи рентгеновских лучей можно изучить строение кристаллических тел.

Работами В. Г. Брэгга и В. Л. Брэгга (отец и сын) в Англии и Г. В. Вульфа в Москве было показано, что рентгеновские лучи позволяют очень точно и очень детально определять структуру кристалла.

Среди богатейшего многообразия твердых тел природы бóльшая их часть имеет кристаллическую структуру. Какие особенности отличают кристалл от аморфного тела (не имеющего кристаллического строения)? По внешним признакам кристаллы в отличие от аморфных тел характеризуются своей формой, ограниченной, как правило, естественными плоскими гранями, пересекающимися друг с другом под некоторыми углами. Благодаря этому любой кристалл имеет форму многогранника, простейшим из которых является правильный куб.

Физические свойства аморфных тел не зависят от направления. Так, если вырезать из литого стекла какую-нибудь фигуру, например параллелепипед, а затем измерить удельную электропроводность, диэлектрическую проницае-

мость, коэффициент теплопроводности, показатель преломления или любую другую физическую величину вдоль одной оси параллелепипеда, потом вдоль другой оси, а затем вдоль третьей, мы убедимся в том, что полученные численные значения будут совершенно идентичны. Эта особенность аморфных тел называется изотропностью, а тела, физические свойства которых не зависят от направления, называются изотропными.

Совершенно иная картина наблюдается у кристалл... Кристаллы в отличие от аморфных тел анизотропны. Это значит, что некоторые физические свойства кристаллов зависят от направления. Естественно, что для разных форм кристаллов степень анизотропии различна. Наименьшей анизотропностью обладает кубический кристалл. Для большинства кристаллов наиболее ярко проявляется анизотропия в отношении их механических свойств.

В противоположность аморфным телам кристаллы при строго определенной температуре плавятся, переходят в жидкое состояние.

Указанные, а также другие свойства кристаллов объясняются особенностью их структуры. Кристаллы обладают упорядоченным внутренним строением. Частицы — атомы, ионы или молекулы, — из которых построен кристалл, образуют правильную, закономерную, периодичную пространственную решетку. Подобная решетка получается при пересечении трех систем плоскостей, причем каждая система характеризуется тем, что все составляющие ее плоскости друг другу параллельны и находятся на равном расстоянии друг от друга.

Частицы, образующие кристалл, располагаются в узлах пространственной решетки. Тепловое движение этих частиц проявляется лишь в том, что частицы — молекулы, атомы или ионы — совершают колебания около узлов, которые, таким образом, являются центрами теплового колебательного движения. Следовательно, если не принимать во внимание тепловое движение, можно считать, что частицы кристалла закреплены в узлах пространственной решетки.

Еще в 1885 г. известный петербургский кристаллограф Е. С. Федоров за несколько лет до открытия рентгеновских лучей на основе глубокого теоретического анализа показал, что все существующие в природе разновидности кристаллов обладают 230 различными видами симметрии. Последующее рентгеноструктурное изучение строения кристаллов полностью подтвердило выводы Е. С. Федорова.

В процессе образования кристалла характер возникающей решетки, ее тип, зависит от характера сил взаимодействия между частицами, образующими данный кристалл. То обстоятельство, что все кристаллы обладают упорядоченным внутренним строением, объясняется тем, что подобная структура при данном характере сил связи отвечает минимуму потенциальной энергии. В этом случае решетка будет находиться в устойчивом равновесии. Поэтому для каждого конкретного кристалла его форма, а следовательно, и тип решетки определяются чисто энергетическими соотношениями. При всех прочих равных условиях кристалл представляет собой такое твердое тело, в котором образующие его частицы наиболее плотно и рационально «упакованы». Понятно, что плотность упаковки для различных кристаллов может быть различной.

В зависимости от того, из каких частиц построен кристалл, соответственно различают молекулярные, атомные, ионные и металлические кристаллические решетки.

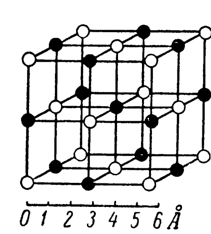
Атомные решетки создаются в том случае, когда атомы, образующие кристалл, связываются при посредстве так называемых электронных пар. Под электронной парой следует понимать такие два движущихся вокруг ядер электрона, которые обладают одинаковой энергией и противоположно направленными магнитными моментами. Каждый электрон можно рассматривать как маленький магнитик, имеющий магнитную ось. В рассматриваемом случае, когда электронная пара движется вокруг ядер, магнитные оси электронов устанавливаются параллельно друг другу, а их одноименные полюса при этом направлены в противоположные стороны. Рассмотрим для простоты молекулу водорода H_2. Каждый атом водорода состоит из ядра и одного вращающегося вокруг него электрона. Когда два водородных атома объединяются в молекулу, тогда два электрона начинают симметрично двигаться вокруг обоих ядер. В такой системе эти электроны, притягиваясь к ядрам, как бы цементируют их, не давая им разойтись.

В других молекулах подобная связь может осуществляться двумя, тремя или даже четырьмя электронными парами.

Ионные решетки образованы противоположными по знаку ионами, закрепленными в ее узлах. Примером ионных кристаллов могут служить: поваренная соль ($NaCl$), хлористый цезий ($CsCl$) и другие соединения. В узлах ионной решетки поочередно располагаются положительные ионы

металла и отрицательные ионы металлоида. В этом случае связь между ионами осуществляется электростатическими силами, описываемыми законом Кулона.

На фиг. 1 представлена схема решетки хлористого натрия ($NaCl$). Здесь черными кружочками обозначены ионы натрия (Na^+), а белыми—ионы хлора (Cl^-). Из рассмотрения фиг. 1 видно, что каждый ион натрия окружен шестью ионами хлора и каждый ион хлора—шестью ионами натрия.



Фиг. 1. Кристаллическая решетка хлористого натрия ($NaCl$).

От величины сил взаимодействия, связывающих ионы друг с другом, зависят такие свойства кристалла, как его твердость, растворимость и температура плавления. Чем больше силы взаимодействия между ионами, тем выше температура плавления и твердость кристалла. Действительно, физическая природа плавления заключается в том, что нарушается связь между частицами, образующими кристалл. Естественно, что чем сильнее эта связь, тем большую энергию нужно затратить на ее преодоление, а следовательно, и до тем большей температуры нагреть кристалл. С этой точки зрения становится понятным и способность кристалла растворяться в жидкости. Ведь растворение также сводится к нарушению связей между ионами. Следовательно, чем больше силы взаимодействия между ионами решетки, тем в меньшей степени кристалл способен растворяться.

В узлах пространственной решетки металла помещаются лишь положительные ионы металла. Между положительными ионами действуют силы взаимного отталкивания, а не притяжения и поэтому подобная решетка, казалось, должна бы распасться, что, однако, не наблюдается. Этот, на первый взгляд непонятный факт объясняется тем, что в металле имеются свободные электроны. Взаимодействуя с положительными ионами, свободные электроны обеспечивают устойчивость решетки металла, не дают ей распасться и сами не могут легко выйти за ее пределы.

В узлах молекулярной решетки молекулы связаны друг с другом относительно слабыми силами, механизм действия которых также сводится к электрическому взаимодействию. Это взаимодействие может возникнуть в двух случаях. Первый имеет место тогда, когда молекула в электрическом смысле асимметрична. Это означает, что несмотря на то,

что молекула в целом нейтральна, центры тяжести положительных и отрицательных зарядов молекулы сдвинуты друг относительно друга. При соответствующей ориентации друг относительно друга такие молекулы начнут притягиваться друг к другу.

Во втором случае сила притяжения между молекулами может возникнуть даже тогда, когда молекулы, будучи по своей природе не полярны, становятся полярными при достаточном сближении. Как и в первом случае, полярность возникает за счет того, что центры тяжести отрицательных и положительных зарядов молекулы сдвигаются друг относительно друга. Молекулярные кристаллические решетки имеют кристаллы льда и ряд органических веществ.

Таковы в самых общих чертах основные представления о связях в кристаллических решетках и их структуре. Рассмотренные типы связей представляют собой предельные случаи. В реальных кристаллах имеют место и все промежуточные типы связей.

ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ КРИСТАЛЛОВ

Выясним физическую природу электропроводности электронных полупроводников.

Напомним, что атом любого вещества представляет собой систему, состоящую из положительно заряженного ядра и вращающихся вокруг него электронов, каждый из которых обладает зарядом $e = 4{,}8 \cdot 10^{-10}$ CGSE. В любом нейтральном атоме суммарный заряд его электронов равен заряду его ядра. Число электронов атома в точности соответствует его порядковому номеру в периодической системе Менделеева. В атоме каждого вещества электроны распределяются как бы по этажам, образуя электронные оболочки. Характерно, что в каждой электронной оболочке может находиться не более некоторого и вполне определенного числа электронов. Самая первая и наиболее близкая к ядру оболочка K может вместить лишь два электрона, вторая оболочка, обозначаемая буквой L, — восемь, третья оболочка M — 18, четвертая N — 32 электрона и т. д. Не у всех атомов электронные оболочки целиком заполнены тем количеством электронов, которые эти оболочки могут вместить. Чаще всего наружные оболочки бывают незаполненными. Так, например, в состав атома лития входят три электрона, два из них находятся в первой оболочке, а третий электрон — во второй. Второй оболочке атома лития не хватает,

следовательно, семи электронов. В атоме азота имеется семь электронов. В первой оболочке два, во второй — пять. Таким образом, во второй оболочке могло бы разместиться еще три электрона.

Каждый электрон обладает некоторой энергией. Однако электроны, входящие в состав атома, не могут обладать любой энергией, а могут находиться лишь в «разрешенных» энергетических состояниях. Если мы рассматриваем какой-нибудь атом, то электроны этого атома распределены по строго определенным энергетическим состояниям, или, как их еще иначе называют, «уровням». Электрон при определенных условиях может переходить с одного энергетического уровня на другой, «разрешенный» уровень, но не может находиться в каком-то промежуточном «запрещенном» состоянии.

Опыт и теория показывают, что в атоме не может быть больше двух электронов, находящихся в одном и том же энергетическом состоянии. Поэтому даже в самом сложном атоме все электроны распределены по своим энергетическим уровням. Так как электроны связаны с ядром атома силами притяжения, то переход электрона с более низкого уровня на более высокий связан с затратой энергии, которую нужно сообщить электрону. Обратный переход, переход с более высокого уровня на более низкий, сопровождается потерей электроном энергии. Так как электроны в атоме могут занимать лишь некоторые вполне определенные энергетические уровни и не могут находиться на промежуточных «запрещенных» уровнях, то как потеря энергии электроном, так и ее приобретение происходят не непрерывно, а скачками.

При переходе электрона с более высокого энергетического уровня на более низкий излучается один квант света. И, наоборот, поглощение световых квантов атомами вещества сопровождается переходом электронов с одних уровней на более высокие.

Ряд экспериментальных фактов показал, что свет излучается и поглощается не непрерывным потоком, а отдельными порциями. Последние в физике получили название квантов света или фотонов. Таким образом, фотон — это элементарная порция излучения. Световой поток, следовательно, имеет прерывистую структуру и состоит из громадного числа фотонов. С другой стороны, всякому излучению присущи и волновые свойства, которые тем ярче проявляются, чем меньше частота. Излучение одновременно

обладает как волновыми, так и квантовыми свойствами, но в одних случаях (бо́льшая частота) легко обнаруживаются квантовые свойства, в других (малая частота) легко наблюдаются волновые свойства.

Находясь на уровне, условно обозначенном цифрой 2, электрон обладает энергией W_2. Находясь на более низком уровне, обозначенном цифрой 1, электрон обладает энергией W_1. При переходе электрона с уровня 2 на уровень 1 атом излучает фотон с энергией ε, равной $\varepsilon = W_2 - W_1$.

Современная наука установила, что существует совершенно строгое, никогда не нарушаемое соотношение между частотой световых колебаний и величиной энергии фотона. Чем больше частота испускаемого света, тем больше энергия фотона, и наоборот, с уменьшением частоты его энергия уменьшается. Выражение

$$\varepsilon = h\nu$$

и будет отражать это соотношение. Здесь ν — частота света, а h — константа, называемая «постоянной Планка» и равная $6{,}62 \cdot 10^{-27}$ эрг · сек.

Если атомы находятся друг от друга на сравнительно большом расстоянии (например, в разреженном газе), то электрические поля одних атомов практически не влияют на атомы, находящиеся по соседству. Совершенно иная картина наблюдается в твердых телах. В кристалле атомы расположены упорядоченно и находятся друг от друга на достаточно близких расстояниях. Поэтому поля соседних атомов взаимно влияют друг на друга. В результате внутри кристаллической решетки образуется периодическое электрическое поле. В случае идеального беспримесного кристалла с идеально правильной решеткой в ней должно существовать строго периодическое электростатическое поле. В действительности же идеальных кристаллов в природе не существует, и поэтому периодичность поля в отдельных местах обычно нарушается.

В изолированном атоме имеются энергетические уровни, на каждом из которых может располагаться не более двух электронов. Когда N подобных атомов, сближаясь на близкие расстояния, образуют твердое кристаллическое тело, поля отдельных атомов складываются друг с другом, что приводит к появлению периодического поля. Вследствие взаимного влияния полей соседних атомов каждый уровень атома «расщепляется» на N близких по величине, но все же различных уровней кристалла, на каждом из которых мо-

жет находиться по два электрона. Эти N уровней образуют полосу или энергетическую зону. Зоны отделяются друг от друга областями энергии, в которых электроны не могут находиться. Эти области называются запрещенными зонами. Вблизи абсолютного нуля температуры все электроны полупроводника занимают наинизшие энергетические уровни. При этой температуре будут чередоваться полностью заполненные электронами зоны разрешенных уровней с запрещенными зонами.

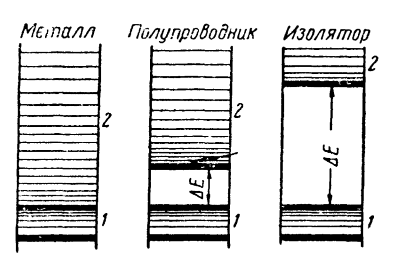
Наиболее близкие к ядру электроны настолько крепко связаны со своими ядрами, что не могут участвовать в электропроводности. Последняя обусловливается лишь валентными электронами, т. е. самыми внешними электронами, обладающими к тому же наивысшими значениями энергии.

Валентные электроны, так же как и более глубокие электроны, при температуре, близкой к абсолютному нулю, занимают свои основные наинизшие уровни. Однако помимо основных уровней в полупроводниковом кристалле существуют так называемые уровни возбуждения, уровни с более высокими значениями энергии. Электроны могут переходить с основных уровней на уровни возбуждения лишь в том случае, если для этой цели им будет сообщена необходимая дополнительная энергия.

Рассмотрим структуру энергетических зон твердого тела. Характер этой структуры будет резко зависеть от того, с чем мы имеем дело — с металлом или полупроводником. В первом случае к основной зоне непосредственно примыкает зона возбужденных уровней. Эти зоны могут взаимно перекрываться. Вблизи абсолютного нуля температуры основная зона целиком заполнена электронами, а непосредственно к ней примыкающая или перекрывающая ее зона возбужденных уровней свободна. Поэтому электроны основной зоны имеют принципиальную возможность перейти с одних уровней на более высокие. Такой переход сам собой не произойдет. Но если к телу приложить внешнее электрическое поле, то под его влиянием электроны начнут двигаться направленно, меняя при этом свою энергию и переходя на более высокие уровни. В результате этого возникнет проводимость.

Рассмотрим теперь структуру энергетических зон полупроводника (фиг. 2). Вблизи абсолютного нуля температуры наивысшая заполненная зона *1* целиком заполнена валентными электронами. Далее следует запрещенная зона, а над ней находится свободная зона *2*. Для того чтобы возникла

электропроводность, необходимо, чтобы некоторое число электронов перешло из сплошь заполненной зоны в свободную, где они смогли бы перемещаться под действием внешнего электрического поля. В противном случае даже при наличии электрического поля никакой проводимости возникнуть не может, потому что в сплошь занятой энергетической зоне электроны не могут изменить своего состояния. В лучшем случае они могут обменяться своими «местами». Однако такой обмен никак не скажется на общем состоянии электронов. Для того чтобы в полупроводнике возник ток, необходимо, чтобы часть электронов основной зоны перешла в верхнюю зону возбужденных уровней. Но для того чтобы электрон смог совершить переход в свободную зону, нужно сообщить ему некоторое количество энергии ΔE. Без затраты внешней энергии перемещение электронов на более высокие энергетические уровни невозможно, а следовательно, невозможно и возникновение электрического тока. Таким образом, наличие запрещенного участка энергии «шириной» ΔE, где величина ΔE для разных полупроводников имеет значения от нескольких десятых до 1,5 *эв* (электрон-вольт), отличает полупроводник от металла.



Фиг. 2. Энергетическая структура спектра электронов металла, полупроводника и изолятора.

С точки зрения подобных представлений становится ясным ответ на вопрос, что такое изоляторы. Изоляторы — это такие вещества, которые характеризуются тем, что «ширина» запрещенной зоны ΔE у них имеет сравнительно большое значение, от 1,5 до нескольких электрон-вольт. Как логический вывод из подобного заключения следует, что невозможно провести четкую грань между полупроводниками и изоляторами лишь по величине ΔE. Однако этот признак во многих отношениях весьма характерен и играет важную роль в теории полупроводников.

Таким образом, лишь металл при всех условиях всегда обладает хорошей электропроводностью. Изоляторы и полупроводники при температуре, близкой к абсолютному нулю, имеют очень большое удельное сопротивление. Более того, даже при обычных, комнатных температурах как изоляторы, так и полупроводники должны были бы обладать очень

большим удельным сопротивлением. В отношении изоляторов это предположение оправдывается: мы знаем вещества с удельным сопротивлением, доходящим до 10^{20} *ом · см*. Что же касается полупроводников, то все они без исключения при комнатной температуре обладают заметной электропроводностью, лежащей в пределах от 10^4 до 10^{-10} $ом^{-1} \cdot см^{-1}$. Казалось бы, что и полупроводники должны были бы очень плохо проводить из-за существования запрещенной зоны ΔE. В действительности же наблюдается другая картина. Причина подобного явления рассмотрена в следующем параграфе.

Остается сказать лишь несколько слов по поводу применяющейся терминологии. Основную энергетическую зону валентных электронов полупроводника, полностью занятую при абсолютном нуле температуры, принято называть з а н я т о й или з а п о л н е н н о й зоной. Ниже будет показано, что в реальных условиях эта зона бывает частично свободной. Тем не менее этот термин укоренился и всюду применяется. Поэтому, когда говорят о занятой зоне, нужно иметь в виду, что эта зона не буквально занята электронами, в данных конкретных условиях, а заполняется ими лишь при абсолютном нуле температуры. Точно так же и зону возбужденных уровней принято называть с в о б о д н о й или з о н о й п р о в о д и м о с т и, хотя в действительности эта зона бывает свободной только при температуре абсолютного нуля.

ЭЛЕКТРОННАЯ И ДЫРОЧНАЯ ПРОВОДИМОСТИ

Наличие энергетических зон позволяет понять механизм электропроводности полупроводников. Для того чтобы электрон мог перейти из заполненной зоны в зону проводимости, ему нужно повысить свою энергию на величину ΔE. Для большинства полупроводников численное значение ΔE лежит в пределах от 0,1 до 1 *эв*. Откуда, из каких источников электрон может добыть эту энергию? Таких источников много. Основным и главным источником является тепловое движение атомов полупроводникового вещества. При обычных, комнатных температурах средняя тепловая энергия частицы не превышает 0,04 *эв*, в то время как количество энергии, которое необходимо затратить на то, чтобы связанный электрон полупроводника мог бы стать электроном проводимости, примерно в 30 раз больше. Выходит, что тепловое движение не в состоянии освободить электроны из заполненной зоны. Однако это не так. Дело в том, что теп-

ловое движение — процесс хаотический, имеющий статистический характер, процесс, в котором участвует колоссальное число частиц. В таком процессе, как, впрочем, и в любом другом, где участвует очень большое число объектов, всегда существуют флуктуации, т. е. отклонения от равномерности, среднего значения. Эти флуктуации, существующие при любой температуре, обусловливают наличие некоторого числа атомов с тепловыми энергиями порядка одного электрон-вольта и даже больше. Подобные атомы при столкновении с соседними, связанными электронами могут передать им свою энергию, вполне достаточную для того, чтобы такой электрон перевести в зону проводимости.

Если бы не было отдельных тепловых флуктуаций, достигающих значений и больших чем 1 *эв,* то большинство чистых полупроводников вплоть до температуры их плавления были бы непроводниками. С повышением температуры тепловое движение становится более интенсивным, число флуктуаций растет, а вместе с ним возрастает и число электронов проводимости. И, наоборот, с уменьшением температуры число флуктуаций уменьшается, а вместе с ним уменьшается и число электронов проводимости, доходя до нуля при абсолютном нуле температуры. Число электронов проводимости зависит от температуры.

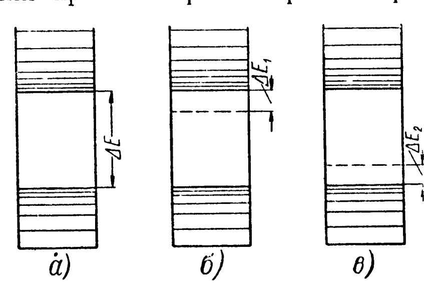
Удельная электропроводность σ в свою очередь тоже зависит от температуры и может быть выражена как

$$\sigma = \sigma_0 e^{-\frac{\Delta E}{2kT}},$$

где ΔE — «ширина» запрещенной зоны; k — постоянная Больцмана; T — абсолютная температура; σ_0 — некоторый постоянный коэффициент, имеющий для многих полупроводников численное значение 10^5.

Таким образом, для полупроводников решающим фактором, определяющим их электропроводность, является наличие теплового движения. Однако ряд экспериментальных данных убедительно показывает, что помимо этого фактора на величину электропроводности полупроводника оказывает сильнейшее влияние введение в полупроводники примесей, т. е. атомов других элементов. Введение в полупроводник ничтожного количества примесей чрезвычайно сильно увеличивает — иногда в десятки миллионов раз — удельную электропроводность полупроводников. В металлах наблюдается совершенно обратная картина: введенные в металл примеси снижают величину электропроводности металлов.

Тщательный анализ роли примесей показал, что механизм электропроводности в основном определяется именно примесными атомами. Более того, выяснилось, что совершенно чистых полупроводников в природе практически не существует, а встречаются главным образом лишь примесные полупроводники. Для выяснения физической сущности влияния примесей рассмотрим энергетическую структуру полупроводника, схематически изображенную на фиг. 3. В случае совершенно чистого полупроводника поставщиком электронов в зону проводимости является заполненная зона. При этом электронам необходимо повысить свою энергию на величину ΔE. Введем теперь в полупроводник такую примесь, которая во много раз увеличит электронную проводимость вещества. Но увеличение в несколько раз электропроводности σ может означать такое же увеличение электронов проводимости. С другой стороны, известно, что увеличение числа электронов в зоне проводимости может происходить, во-первых, вследствие возрастания температуры, а во-вторых, из-за уменьшения ширины запрещенной зоны ΔE. Так как в рассматриваемом случае температура не меняется, остается предположить, что введение примесей каким-то образом облегчает переход электронов в зону проводимости.



Фиг. 3. Энергетические уровни примесей.

а — беспримесный полупроводник; *б* — донорные уровни; *в* — акцепторные уровни.

Сопоставляя большое число экспериментальных данных, физики пришли к выводу, что энергетические уровни электронов рассматриваемого сорта примесей располагаются вблизи зоны проводимости, попадая, таким образом, внутрь запрещенной области. Являясь источниками электронов, попадающих в зону проводимости, атомы примеси легко отдают эти электроны потому, что их энергетические уровни имеют более высокое значение, чем энергетические уровни электронов заполненной зоны. Следовательно, для перехода в свободную зону примесные электроны должны повысить свою энергию на величину ΔE_1, которая заведомо меньше ΔE. При абсолютном нуле температуры такие примесные уровни заполнены целиком, а при температурах выше абсо-

лютного нуля они отдают свои электроны в свободную зону и тем интенсивнее, чем выше температура вещества.

Примесные уровни, которые полностью заняты при абсолютном нуле температуры и отдают свои электроны свободной зоне при температурах, отличных от абсолютного нуля, называются донорными уровнями, а сами примеси — донорами (фиг. 3,*б*).

Существуют также примеси совершенно другого характера, получившие название акцепторов. В отличие от донорных уровней акцепторные уровни располагаются вблизи заполненной зоны (фиг. 3,*в*). При абсолютном нуле температуры акцепторные уровни свободны, не заполнены. Следовательно, при температурах, отличных от абсолютного нуля, на такой уровень могут перейти электроны из заполненной зоны. Совершенно очевидно, что при наличии теплового движения атомов и электронов и обязательного существования тепловых флуктуаций последние с большей вероятностью перекинут электрон из заполненной зоны на примесный акцепторный уровень, чем тот же электрон в свободную зону. Почему? Потому что $\Delta E_2 < \Delta E$ и при температуре T на уровни примеси перейдет значительно большее число электронов, чем при тех же условиях — в свободную зону. И чем выше температура T, тем большее число электронов перейдет из заполненной зоны на примесные акцепторные уровни. Однако уход электронов из заполненной зоны дает возможность оставшимся там электронам также принимать участие в проводимости. В самом деле, если в заполненной зоне появляются вследствие ухода оттуда электронов свободные уровни, то естественно, что на эти уровни начнут под действием внешнего электрического поля переходить другие электроны той же зоны. Таким образом, частичный уход электронов из заполненной зоны обусловливает реальную возможность передвижения электронов, оставшихся в этой зоне, с относительно низких уровней на более высокие и, наоборот, с более высоких на низкие уровни, в пределах самой зоны, которая до этого была сплошь заполнена электронами. К чему приводит возможность перемещения электронов в заполненной зоне? Если в свободную зону или на уровни акцепторных примесей перешло из заполненной зоны некоторое количество электронов, то в этой зоне останется точно такое же количество свободных мест, незанятых уровней. Наличие этих незанятых уровней приводит к тому, что оставшиеся в заполненной зоне электроны приобретают возможность перемещать-

ся в пределах этой зоны. Допустим, что с некоторого уровня A заполненной зоны ушел один электрон. Тогда вместо занятого уровня образуется свободный, незанятый, уровень или, — как его не вполне удачно назвали, — «дырка». Эта дырка тотчас же заполняется каким-нибудь ближайшим соседним электроном, но в том месте, откуда ушел этот соседний электрон, образуется новая дырка, которая в свою очередь будет заполнена каким-нибудь другим электроном. Этот электрон также оставит после себя дырку и т. д.

Представим себе, что к полупроводнику приложена разность потенциалов. Что произойдет в этом случае? Под влиянием электрического поля электроны заполненной зоны будут перемещаться против направления электрического поля. При таком преимущественном перемещении электронов дырки вероятнее всего будут заполняться теми именно электронами, которые подходят к ним под действием поля. Но эти электроны будут оставлять после себя новые дырки, которые также будут заполняться электронами, двигающимися против поля. В результате такого процесса в полупроводнике, находящемся в электрическом поле, электроны будут перемещаться от отрицательного полюса к положительному, в то время как дырки — в обратном. Следовательно, если электроны в полупроводнике перемещаются под действием разности потенциалов, допустим, слева направо, то дырки будут перемещаться справа налево. Такова картина движения дырок и электронов в электрическом поле.

Попытаемся теперь несколько глубже понять, что такое дырка. Очевидно, что если в каком-то месте кристаллической решетки ушел электрон, в результате чего в этом месте появилась дырка, то это равноценно тому, что в этом месте появился положительный заряд. Действительно, всякая недостача электрона в прежде нейтральном теле равноценна такому же количественному избытку положительного заряда. Следовательно, всякая дырка ведет себя так, как будто она является положительным зарядом.

В действительности в полупроводнике движутся только электроны, но внешне движение электронов проявляется по-разному в зависимости от того, какие электроны участвуют под действием поля в направленном движении. Если электрический ток осуществляется лишь электронами заполненной зоны, что наблюдается в полупроводнике с акцепторными примесями, то движение носителей соответствует движению положительных зарядов. Если разность потенциалов приложена к полупроводнику с донорными примесями,

то носителями тока являются лишь электроны, находящиеся в свободной зоне.

Таким образом, возможны два механизма электропроводности: электронный и дырочный. Первый соответствует движению электронов в свободной зоне, второй — движению электронов или положительных дырок в заполненной зоне. Первый вызывается донорными примесями, второй — акцепторными.

Каков же механизм проводимости чистого, беспримесного полупроводника, имеющего идеальную кристаллическую решетку? Под действием тепловых флуктуаций электроны из заполненной зоны перебрасываются в свободную зону, в зону проводимости, в которой они ведут себя примерно так, как свободные электроны металла. Казалось бы на первый взгляд, что в этом случае мы имеем дело с типично электронным механизмом проводимости. Однако такой вывод был бы поспешным. В самом деле, одновременно с переходом электронов в зону проводимости из заполненной зоны в последней возникают дырки, способные перемещаться под действием электрического поля, создавая тем самым дырочный ток. Ясно, что при этих условиях число электронов проводимости будет в точности соответствовать числу дырок. Если теперь к такому чистому полупроводнику приложить внешнее электрическое поле, то под его влиянием электроны проводимости будут двигаться против поля, создавая электронный ток, а дырки начнут двигаться в направлении поля, создавая дырочный ток. Следовательно, общий суммарный ток в таком полупроводнике сложится из двух токов: электронного и дырочного, и его значение будет равно

$$I = I_{эл} + I_{дыр}.$$

Но

$$I_{эл} = n_{-}eu_{-}SE,$$

а

$$I_{дыр} = n_{+}eu_{+}SE.$$

Следовательно,

$$I = n_{-}eu_{-}SE + n_{+}eu_{+}SE,$$

где n_{+} и n_{-} — соответственно концентрации дырок и электронов;

e — заряд электрона и дырки;

u_{+} и u_{-} — соответственно подвижности дырок и электронов, т. е. средние скорости их передвижения под влиянием электрического поля в 1 *в/см*;

E — напряженность электрического поля;

S — площадь поперечного сечения полупроводника.

В суммарном токе I его электронная часть не равна дырочной, т. е. $I_{эл} \neq I_{дыр}$. Несмотря на полное равенство концентраций электронов и дырок, электронный ток $I_{эл}$ все же больше дырочного тока $I_{дыр}$. Дело в том, что подвижность электронов несколько больше подвижности дырок и поэтому электронная составляющая тока I будет преобладать над его дырочной составляющей. Именно поэтому идеально чистый, беспримесный полупроводник имеет слабо выраженный электронный механизм проводимости.

Попутно отметим, что проводимость, наблюдаемая в беспримесных полупроводниках, называется собственной проводимостью, а эти полупроводники—собственными полупроводниками. Проводимость же, обусловленная примесями, называется примесной проводимостью, а полупроводники, имеющие примеси, получили название примесных полупроводников.

В каждом реальном полупроводящем веществе, т. е. примесном, характер проводимости фактически определяется температурой полупроводника: при достаточно низких температурах электропроводность обусловливается главным образом примесями. По мере повышения температуры увеличивается число флуктуаций, способных перебросить в свободную зону большее число электронов из нижней зоны. И, наконец, при достаточно высоких температурах вступает полностью в действие собственная проводимость вещества.

Рассматривая влияние примеси на механизм проводимости полупроводников, нельзя не отметить, что роль примесей выполняют не только атомы посторонних веществ. Такой же эффект возникает и в том случае, когда «примесями» являются сами же атомы элементов, образующих то или иное полупроводниковое соединение. Только в этом случае необходимо, чтобы существовало избыточное число атомов того или иного элемента над соотношением, определяемым химической формулой данного полупроводника. При этом, как правило, наличие избыточного числа атомов металла приводит к электронной проводимости, в то время как избыточное число атомов металлоида сообщает полупроводнику дырочную проводимость. Так, например, в сернистом таллии (Tl_2S) избыток таллия обусловливает электронную проводимость, а избыток серы — дырочную, в сер-

нистом свинце (PbS) избыток свинца приводит к электронной проводимости, а избыток серы — к дырочной и т. д. Хотя это правило нельзя распространять на все полупроводники, тем не менее для многих веществ оно выполняется с достаточной строгостью.

Влияние примесей на величину и характер электропроводности, а также существование электронного и «дырочного» механизма проводимости являются важными факторами, играющими существенную роль в техническом использовании полупроводников.

ЭНЕРГИЯ ДИССОЦИАЦИИ

Ширина запрещенной зоны ΔE, иначе называемая энергией диссоциации, представляет собой важную физическую величину, во многом определяющую электрические свойства полупроводника. Таким же образом и энергия активации примесей ΔE_1 является фундаментальным параметром полупроводника. Знание этих величин имеет большое значение.

Удельная электропроводность σ чистого беспримесного полупроводника, как уже было показано, зависит от температуры, т. е.

$$\sigma = \sigma_0 e^{-\frac{\Delta E}{2kT}}.$$

Однако в практике встречаются главным образом с примесными полупроводниками. Так как энергия активации примесей ΔE_1 меньше ширины запрещенной зоны ΔE, то в определенном температурном интервале проявляется в основном примесная проводимость, а при более высоких температурах — собственная. Следовательно, температурная зависимость электропроводности примесного полупроводника должна выражаться более общей формулой

$$\sigma = \sigma_0 e^{-\frac{\Delta E}{2kT}} + \sigma_1 e^{-\frac{\Delta E_1}{2kT}},$$

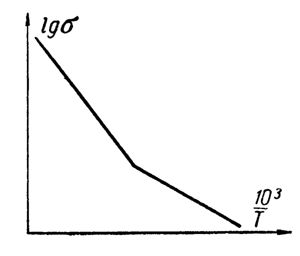
где первый член отвечает собственной проводимости, а второй—примесной.

При низких температурах первый член этой формулы практически равен нулю, так как проводимость вещества определяется в основном примесями. С повышением температуры все большую роль начинает играть собственная про-

водимость. В конце какого-то температурного интервала примесные центры полностью истощаются, т. е. не могут больше поставлять электронов, и проводимость вещества определяется лишь собственной проводимостью.

Зная закон зависимости электропроводности от температуры, нетрудно измерить значения E и ΔE_1. Выражая ΔE в электрон-вольтах, получим:

$$\Delta E = 0{,}4 \operatorname{tg} \varphi.$$



Фиг. 4. Температурная зависимость электропроводности примесного полупроводника.

Если определить температурный ход электропроводности примесного полупроводника при переходе от низких температур почти до температуры плавления исследуемого вещества, а затем зависимость $\log \sigma$ от $10^3/T$ изобразить графически, то эта зависимость для большинства полупроводников будет представлять собой ломаную линию (фиг. 4). Участок правой части прямой до излома отвечает примесной проводимости. Левый участок прямой после излома отвечает собственной проводимости вещества.

Изучение температурной зависимости удельной электропроводности полупроводника, давая возможность вычислить ΔE или ΔE_1, тем самым позволяет судить об электрических свойствах данного полупроводника.

ПОДВИЖНОСТЬ НОСИТЕЛЕЙ ТОКА

Численное значение подвижности носителей тока — электронов или дырок — определяет существенные свойства полупроводника. Под подвижностью носителей тока понимают величину, численно равную скорости перемещения электрона или дырки под действием электрического поля напряженностью в 1 *в/см*. Из самого определения подвижности u следует, что

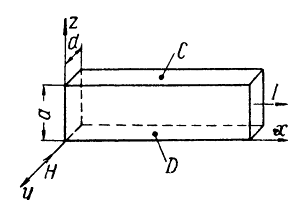
$$u = \frac{v}{E},$$

где v — скорость частицы в поле, равном E. Отсюда вытекает размерность подвижности — *см²/всек*.

Подвижность можно измерить несколькими методами. Один из этих методов заключается в исследовании так на-

зываемого эффекта Холла с последующим измерением электропроводности вещества.

В 1879 г. американский физик Холл открыл явление, которое заключается в следующем. Если через однородную металлическую или полупроводниковую пластинку пропускать ток слева направо, вдоль оси x, как это показано на фиг. 5, то эквипотенциальные линии будут представлять собой прямые линии, параллельные ребру пластинки, идущему вдоль оси z, и между симметрично расположенными точками C и D не будет существовать никакой разности потенциалов. Если затем пластинку поместить в магнитное поле так, чтобы последнее было направлено вдоль оси y, т. е. было перпендикулярно к линиям тока, то между точками C и D возникает разность потенциалов, величина которой пропорциональна как величине тока I, так и напряженности магнитного поля H. Это явление, получившее название эффекта Холла, может быть объяснено следующим образом. На движущийся в магнитном поле электрический заряд действует сила



Фиг. 5. Пояснение эффекта Холла.

$$F = evH \sin\varphi,$$

где e — величина заряда;
v — его скорость;
H — напряженность магнитного поля, а
φ — угол между направлениями v и H.

Если $\varphi = 90°$ (когда магнитное поле перпендикулярно направлению движущегося заряда), то сила F имеет максимальное значение, равное evH и направлена перпендикулярно к направлениям скорости и магнитного поля.

Из элементарного курса механики известно, что если на движущееся тело действует сила и при этом направления скорости и силы взаимно перпендикулярны, то сила меняет лишь направление скорости, не меняя ее величины, а само тело движется по круговой траектории с радиусом кривизны r. Очевидно, что и в рассматриваемом случае движения электрического заряда в постоянном магнитном поле заряд будет двигаться по окружности радиуса r, величина которого может быть найдена, если учесть, что

центробежная сила $\frac{mv^2}{r}$ численно равна действующей на заряд силе evH, т. е. $\frac{mv^2}{r} = evH$, откуда $r = \frac{mv}{eH}$.

В полупроводнике или в металле, помещенном в магнитное поле при прохождении тока, образующие его электроны под влиянием действующей на них магнитной силы начнут отклоняться вверх или вниз в зависимости от направлений H и v. Если электроны движутся справа налево, они будут отклоняться вверх и заряжать отрицательно верхнюю грань пластинки. Вследствие этого возникнет поперечное электрическое поле напряженностью в E *в/см* и между точками C и D появится разность потенциалов

$$V = Ea,$$

где a — высота ребра пластинки (фиг. 5).

Отклоняющиеся кверху электроны будут заряжать верхнюю грань до тех пор, пока не наступит равновесное состояние, при котором исчезнет поперечный ток. Это состояние наступит тогда, когда электрическая сила Ee станет равной магнитной силе evH, т. е. $eE = evH$. Ток, текущий через полупроводниковую пластинку, будет равен

$$I = nevad,$$

где n — концентрация носителей тока.

Подставляя значение v, полученное из последней формулы, будем иметь

$$E = \frac{1}{ne} \frac{IH}{ad}.$$

С другой стороны, мы выяснили, что разность потенциалов между точками C и D равна $V = Ea$. Подставляя вместо E его значение, получим окончательное выражение для

$$V = \frac{1}{ne} \frac{IH}{d}.$$

Из этой формулы видно, что разность потенциалов, возникающая между двумя точками полупроводника, пропорциональна как току I, так и напряженности магнитного поля H. Дробь $\frac{1}{ne}$ для каждого данного полупроводника, находящегося при одной и той же температуре, представляет собой постоянную величину, получившую назва-

ние постоянной Холла. Более точная теория, учитывающая участие в токе электронов, обладающих различными скоростями, дает для постоянной Холла, обычно обозначаемой через R, выражение

$$R=\frac{3\pi}{8}\cdot\frac{1}{ne}.$$

Таким образом, изучая эффект Холла в полупроводниках, измеряя величину $R=\frac{3\pi}{8}\cdot\frac{1}{ne}$, можно определять концентрацию носителей n, а по знаку возникающей между точками C и D разности потенциалов — механизм проводимости полупроводников. Для дырочного полупроводника постоянная Холла имеет положительное значение, а для электронного — отрицательное.

Следует иметь в виду, что с помощью эффекта Холла можно определять концентрацию носителей тока лишь в полупроводниках, обладающих каким-нибудь одним механизмом проводимости — дырочным или электронным. Если полупроводник имеет смешанную или собственную проводимость, то проходящий в полупроводниковой пластинке ток обусловлен движением дырок в одном направлении и электронов в противоположном. При заданном направлении тока и магнитного поля отклонения дырок и электронов совпадают: и те, и другие отклоняются или к нижней грани пластинки, или к верхней. Возникающая между точками C и D разность потенциалов V будет определяться в этом случае уже более сложным выражением, куда входят концентрации носителей тока и их подвижности. Из чисто физических соображений нетрудно понять, что величина и знак V будут зависеть от соотношения величин концентраций дырок и электронов и их подвижностей. В отдельных частных случаях V может равняться нулю.

Для полупроводников смешанного типа постоянная Холла определяется выражением

$$R=\frac{3\pi}{8e}\frac{n_-u_-^2-n_+u_+^2}{(n_+u_++n_-u_-)^2}.$$

Для полупроводника же с собственной проводимостью, когда

$$n_+=n_-=n,$$

постоянная Холла

$$R=\frac{3\pi}{8}\cdot\frac{1}{ne}\cdot\frac{u_--u_+}{u_-+u_+}.$$

С помощью эффекта Холла можно устанавливать также и величину подвижности носителей тока. Для этой цели, кроме измерения R, нужно еще измерить величину электропроводности данного полупроводника. Если последний обладает каким-нибудь одним механизмом проводимости — электронным или дырочным, то произведение удельной электропроводности на постоянную Холла позволит нам вычислить значение подвижности

$$\sigma R = neu\frac{3\pi}{8}\cdot\frac{1}{ne} = \frac{3\pi}{8}u,$$

или

$$u = \frac{8}{3\pi}\sigma R.$$

В теории твердого тела подвижность носителей тока играет фундаментальную роль, так как она отражает характер взаимодействия носителей тока с частицами, образующими кристаллическую решетку. В идеальном периодическом поле, каким должно было бы быть поле идеально чистого кристалла при абсолютном нуле температуры, электроны при своем движении не испытывали бы никакого сопротивления. Но такой случай на практике невозможен. В реальных условиях наблюдается иная картина. Тепловое движение создает флуктуации плотности и электрического поля. Чужеродные атомы примесей или избыточные атомы, а также всевозможные включения приводят к местным искажениям решетки. Все это обусловливает те препятствия на пути движения электронов в теле, которые внешне проявляются в том, что вещество, как мы говорим, обладает электрическим сопротивлением. В переводе на физический язык это означает, что подвижность носителей тока в данных конкретных условиях имеет не беспредельно большое значение, а вполне конечную величину. Поэтому определение численного значения подвижности представляет большой теоретический и практический интерес. То обстоятельство, что подвижность носителей тока в реальном полупроводнике имеет конечную величину, численное значение которой зависит от рода кристаллической решетки, химического состава полупроводника и от числа нарушений порядка в решетке, объясняется тем, что имеет место рассеяние электронов на этих нарушениях. В процессе движения под действием электрического поля электроны испытывают на своем пути многочисленные столкновения, в результате чего меняется их скорость как по величине, так и по направ-

лению, т. е. происходит именно то, что принято называть рассеянием.

Поэтому подвижность в чистом полупроводнике имеет большее численное значение, чем в полупроводнике с примесями. Примеси, как правило, снижают величину подвижности. Для большинства полупроводников подвижность электронов больше подвижности дырок. Поэтому в собственных полупроводниках, где число электронов и дырок равно друг другу, при прохождении тока его электронная часть преобладает над дырочной.

Величина подвижности носителей тока для разных полупроводников имеет различное значение и колеблется в пределах от десятых долей до 80 000 *см²/в сек*.

Согласно теоретическим соображениям следовало ожидать, что величины подвижностей должны зависеть от рода самой кристаллической решетки. И действительно, экспериментальная проверка подтвердила это. В полупроводниках с ионной решеткой подвижность меньше, чем в полупроводниках с атомной решеткой. Разумеется, это различие в величинах подвижностей определяется различием в характере взаимодействия электронов с решеткой. Когда электронам приходится сталкиваться с нейтральными атомами, рассеяние электронов не столь велико. Гораздо больше и интенсивнее электроны рассеиваются при встрече с колеблющимися ионами, образующими ионную решетку, так как взаимодействие электронов с ионами значительно сильнее, чем взаимодействие с нейтральными атомами.

В табл. 1 приведены численные значения подвижностей для некоторых полупроводников.

Таблица 1

Значения подвижности некоторых полупроводников

Вещество	Знак носителей	Подвижность при $T = 3\,000°$ К, *см²/в сек*	Тип решетки
Окись меди (CuO) . . .	—	0,26	Ионная
Закись меди (Cu_2O) . .	+	100—150	То же
Сернистый свинец (PbSe)	—	250	„ „
Селенистый свинец (PbSe)	—	500—700	„ „
Германий (Ge)	—	3 900	Атомная
Германий (Ge)	+	1 900	То же
Кремний (Si)	—	1 200	„ „
Кремний (Si)	+	250	„ „

С точки зрения изложенных выше представлений на природу подвижности становится понятным характер ее зависимости от температуры. С повышением температуры полупроводника усиливается тепловое движение, а вместе с ним увеличивается и степень беспорядка в кристаллической решетке полупроводникового вещества, что влечет за собой более частое столкновение электронов с частицами, образующими решетку. В результате этого рассеяние электронов становится более интенсивным и подвижность носителей с повышением температуры падает. И, наоборот, с понижением температуры подвижность растет.

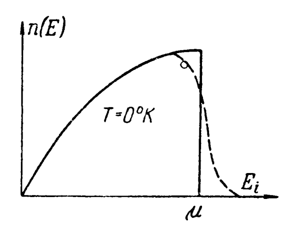
В полупроводниках с атомными решетками при высоких температурах подвижность согласно теории должна зависеть от температуры по закону $u = AT^{-3/2}$, где A — постоянный для данного полупроводника коэффициент.

Величина подвижности имеет существенное значение как в теории полупроводников, так и для практических целей. Разрешение ряда практических вопросов зависит от получения полупроводников с большим значением подвижности носителей тока.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ ПО ЭНЕРГИЯМ

При ознакомлении с энергетической зонной структурой твердого тела у читателей иногда возникает неправильное представление о кристалле как о теле, состоящем якобы из энергетических зон. В действительности ничего подобного нет. Теория энергетических зон отражает лишь энергетическое состояние электронов в твердом теле. Само же твердое тело построено не из зон, а из частиц — атомов, ионов или молекул, образующих кристаллическую решетку. Когда мы говорим об электронах заполненной или свободной зоны, то при этом нужно всегда помнить, что мы не имеем в виду каких-либо электронов, находящихся в зонах, имеющих пространственные геометрические размеры. Когда идет речь об электронах заполненной или свободной зоны, это значит, что такие-то электроны обладают энергиями в пределах от одних значений до других. Этими пределами и являются как раз верхние и нижние границы зон, которые обычно изображаются на диаграмме, где на вертикальной оси откладываются значения энергии. Сами электроны заполненной и свободной зон в действительности распределены во всем объеме кристаллической решетки.

При абсолютном нуле температуры все свободные электроны занимают наинизшие уровни. Так как на одном и том же энергетическом уровне не может находиться больше двух электронов, то все электроны займут некоторые уровни со значениями энергий от нуля до 5—10 *эв*. Установим закон распределения валентных электронов металла по их энергиям при абсолютном нуле температуры. Другими словами, выясним, сколько имеется электронов в 1 *см*^{3} металла с набором энергий от E_1 до $E_1 + \Delta E = E_2$, от E_2 до $E_2 + \Delta E = E_3$ и т. д. Решение этой задачи позволит выяснить, сколько имеется электронов с энергиями, заключенными в пределах ΔE, если этот энергетический промежуток находится на различных „расстояниях" от нулевого значения энергии. Если аналитическую зависимость числа электронов от энергии изобразить графически, то получится кривая, получившая наименование кривой распределения Ферми-Дирака. Будем откладывать на оси абсцисс равные интервалы энергии ΔE, а на оси ординат — число электронов n, обладающих энергиями, лежащими в интервале значений от E_i до $E_i + \Delta E$, где E_i — некоторое переменное значение энергии, пробегающее ряд E_1, E_2, E_3, E_4, E_5, E_6 и т. д. Тогда кривая будет иметь вид, представленный на фиг. 6. Необходимо еще раз напомнить, что эта кривая отражает зависимость n от E при абсолютном нуле температуры.



Фиг. 6. Распределение свободных электронов металла по энергиям.

На фиг. 6. крайняя точка на оси абсцисс отмечена буквой μ, обозначающей максимальное значение энергии, которой может обладать свободный электрон металла при температуре абсолютного нуля. Заметим, что численное значение μ лежит в пределах от 5 до 10 *эв*.

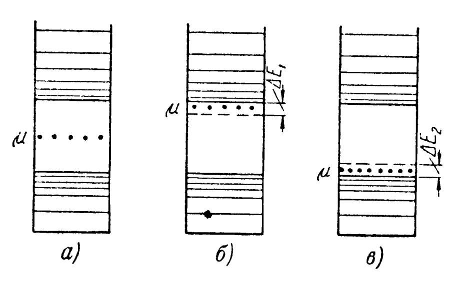
Из законов молекулярной физики следует, что средняя тепловая энергия частицы (в том числе и электрона) равна $^3/_2\ kT$, где k — постоянная Больцмана, а T — абсолютная температура. Так, например, значение этой энергии при $T = 1\,600°$ К будет $^3/_2\ kT = 0{,}2$ *эв*. Таким образом, средняя тепловая энергия атомов металла при такой высокой температуре, как 1 600° К, составляет всего лишь 0,2 *эв*, в то время как максимальная энергия свободного электрона

в металле при $T = 0°$ K равна примерно 10 *эв*. Следовательно, под влиянием теплового движения даже при такой высокой температуре, как 1 600° K, распределение электронов по энергиям изменится очень мало вследствие небольшого изменения энергии электронов вблизи наибольшего значения энергии μ (фиг. 6), называемого „границей Ферми" или „уровнем Ферми".

Из анализа кривой распределения Ферми видно, что бо̀льшая часть свободных электронов металла обладает энергией, близкой по значению к μ. При температуре, равной абсолютному нулю, электроны с энергиями больше μ отсутствуют. При температурах, отличных от абсолютного нуля, появляются электроны с энергиями, превышающими μ, но их концентрация уменьшается по мере увеличения энергии.

В полупроводниках под влиянием теплового движения электроны, находящиеся в заполненной зоне или же на уровнях донорной примеси, переходят в свободную зону, где будут заполняться уровни, начиная с наинизшего. Очевидно, что электроны, покинувшие нижнюю зону или уровни примесей, составят там пустые места. В зоне проводимости каждый электрон будет в среднем находиться в течение некоторого времени τ, а затем возвратится на какой-нибудь свободный уровень. Следовательно, в любом полупроводнике идет ни на секунду не прекращающийся процесс своеобразного обмена электронов заполненной зоны или примесей, с одной стороны, с электронами свободной зоны — с другой. Результатом этого процесса будет установление динамического равновесия между верхней и нижней зонами, что приводит при данной температуре к постоянству концентрации электронов проводимости n. Аналогичный процесс имеет место и в полупроводнике с акцепторными примесями. Здесь также идет непрерывный обмен электронов заполненной зоны с электронами, находящимися на уровнях акцепторной примеси. В результате установившегося динамического равновесия при некоторой температуре T концентрация дырок n для данного полупроводника будет иметь некоторое, вполне определенное значение. В отличие от металлов концентрация электронов проводимости у полупроводников при комнатной температуре значительно меньше. Эти электроны тоже распределены по энергиям. Математические расчеты показывают, что зависимость числа электронов свободной зоны с энергиями, лежащими в некотором определенном

интервале, от энергии выражается формулой, в которую входит член $e^{-\frac{E-\mu}{kT}}$. Здесь E — энергия электронов в зоне проводимости. По самому своему смыслу E может принимать ряд значений. μ — величина, получившая название химического потенциала. Как видно из формулы, с увеличением E увеличивается абсолютное значение показателя степени множителя, а сам множитель уменьшается. Таким образом, по мере возрастания E плотность электронов в зоне проводимости экспоненциально убывает.



Фиг. 7. Положение уровня химического потенциала.

а — беспримесный полупроводник; *б* — полупроводник с электронными примесями; *в* — полупроводник с дырочными примесями.

В энергетической диаграмме уровень химического потенциала занимает в зависимости от рода полупроводника, содержания в нем примесей и температуры некоторое положение. Для беспримесного полупроводника уровень химического потенциала μ располагается в середине запретной зоны (фиг. 7,*а*). В примесном полупроводнике, обладающем электронным механизмом проводимости, уровень химического потенциала располагается по середине ΔE_1, где ΔE_1 — энергия активации с уровней примеси (фиг. 7,*б*). Для примесного дырочного полупроводника, у которого примесные уровни расположены на высоте ΔE_2 от верхнего края заполненной зоны, уровень химического потенциала находится на половине расстояния от этого же края зоны до ΔE_2 (фиг. 7,*в*).

Положение уровня химического потенциала зависит также и от температуры. Действительно, для примесного полупроводника с электронным механизмом проводимости при низких температурах, когда собственная проводимость практически не сказывается, уровень химического потенциала находится как раз посередине между нижним краем зоны проводимости и уровнями донорных примесей. По мере повышения температуры все большее число электронов переходит из заполненной зоны в зону проводимости: к примесной проводимости добавляется еще и собственная. Это при-

водит к перемещению уровня μ в направлении к заполненной зоне. В пределе при высоких температурах, когда наступает полная ионизация примесей, последние уже не могут быть источниками электронов и возникает собственная проводимость. При этом уровень химического потенциала снижается к середине запрещенной зоны.

В реальных условиях могут быть и другие случаи. Например, могут быть полупроводники с донорными и акцепторными примесями, причем концентрация донорных примесей n_1 не равна концентрации акцепторных примесей n_2, а также не равны друг другу и энергии активации донорных и акцепторных уровней. В этом случае положение уровня химического потенциала будет также вполне определенным.

Ниже показано, что химический потенциал представляет собой фундаментальное физическое понятие, отражающее существенные свойства полупроводника.

РАБОТА ВЫХОДА

В 1884 г. было обнаружено, что с поверхности твердого тела, нагретого до высокой температуры, вылетают в окружающее пространство электроны. Более поздние исследования показали, что интенсивность этого процесса увеличивается с повышением температуры. Это явление, названное термоэлектронной эмиссией, широко применяется в электровакуумной технике.

На первый взгляд может показаться, что свободные электроны металла могут легко покидать пределы металла, вылетая наружу. Однако при обычных температурах, например комнатных, термоэлектронная эмиссия практически не наблюдается. Для того чтобы вылететь с поверхности металла, электрон должен совершить некоторую работу. Когда электрон находится внутри металла, он взаимодействует со всеми окружающими его электронами, а также и с положительно заряженными ядрами. Поэтому равнодействующая всех сил, действующих на электрон, в среднем практически равна нулю. В том же случае, когда электрон подходит к поверхности металла и вылетает наружу, в месте вылета электрона возникает избыток положительного заряда, притягивающий электрон обратно. Для преодоления этого притяжения электрон расходует свою кинетическую энергию, т. е. совершает работу, которую принято называть работой выхода.

Ранее было уже показано, что при абсолютном нуле температуры свободные электроны металла распределены по энергиям от нуля до 5—10 *эв*. Максимальная энергия соответствует границе Ферми. Так как большая часть электронов обладает энергиями, близкими к уровню Ферми, то естественно, что и большинство электронов, покидающих пределы металла, обладает энергией, превышающей уровень Ферми на некоторую величину φ, которая и выражает собой работу выхода.

Так как средняя кинетическая энергия электрона равна $^3/_2\ kT$, то чем выше температура, тем больше величина кинетической энергии. Не все электроны обладают одним и тем же значением кинетической энергии, и в металле всегда существуют электроны с энергиями, превышающими средние значения. Поэтому при любой температуре вблизи поверхности металла найдутся такие электроны, скорости которых направлены наружу, а их кинетические энергии достаточны для совершения работы выхода.

С повышением температуры число таких электронов увеличивается. Поэтому с повышением температуры интенсивность термоэлектронной эмиссии возрастает.

Вылет электронов наружу может происходить и под воздействием других внешних факторов, например в результате электронной бомбардировки поверхностей металла (вторичная электронная эмиссия), облучения светом (внешний фотоэффект), влияния сильного электрического поля (холодная эмиссия) и т. д.

В табл. 2 приведены численные значения работы выхода для чистых металлов и некоторых элементов.

Таблица 2

Значения работы выхода для некоторых элементов

Элемент	Работа выхода, *эв*	Элемент	Работа выхода, *эв*
Алюминий	4,28	Молибден	4,27
Барий	2,29	Никель	4,84
Бор	4,5	Платина	5,29
Висмут	4,28	Рубидий	2,13
Вольфрам	4,5	Свинец	4,02
Германий	4,56	Серебро	4,28
Кальций	2,76	Селен	4,72
Кремний	4,1	Стронций	2,35
Магний	3,46	Сурьма	4,08
Медь	4,47	Цезий	1,89

Так же как и в металлах, выход электрона из полупроводников сопряжен с затратой определенной энергии. В этом случае электроны уходят не с уровня химического потенциала, а с других энергетических уровней. В полупроводнике на уровне химического потенциала μ никаких электронов нет. Уровень химического потенциала расположен в запретной зоне, а все электроны находятся либо в заполненной зоне, либо в свободной, или, наконец, на уровнях примеси. Ясно, что основная масса электронов находится в заполненной зоне, причем плотность энергетических уровней в заполненной зоне растет в направлении от верхней границы зоны к нижней. Таким образом, число электронов в определенном интервале энергии увеличивается в направлении от верхней границы заполненной зоны к ее нижней границе, а вместе с этим возрастает и вероятность вылета электронов из полупроводника под влиянием какого-нибудь внешнего воздействия. Это внешнее воздействие может, например, проявиться в столкновении электрона с каким-нибудь другим быстрым электроном, сообщившим ему сильный лобовой удар в направлении к поверхности полупроводника, в результате чего первый электрон покинет пределы вещества. В этом случае важно, чтобы кинетическая энергия, приобретенная этим электроном, была бы по своей величине больше той работы, которую он затрачивает, преодолевая силы сопротивления в процессе вылета наружу. При таких условиях электронная эмиссия в полупроводниках возникает за счет электронов, обладающих разными энергетическими уровнями в зависимости от типа полупроводника (чистого или примесного). Иными словами, работа выхода полупроводника зависит как от рода примесей (акцепторных или донорных), так и от их количества. Таким образом, электронная эмиссия полупроводника возникает под воздействием какого-нибудь внешнего агента: тепла, излучения, бомбардировки частицами, сильного поля и т. д., и при этом вырываемые электроны поставляются либо заполненной зоной, либо зоной проводимости, либо примесными уровнями. От этих факторов зависит величина работы выхода того или иного полупроводника. Ясно, что разные полупроводники обладают разными значениями работы выхода. Так, например, работа выхода «дырочных» полупроводников в подавляющем числе случаев больше работы выхода электронных.

Работа выхода имеет важное значение во всех приборах, принцип действия которых основан на использовании

эмиссии электронов: фотоэлементах, вторично-электронных умножителях, электронных лампах и т. д. В указанных приборах необходимо как можно больше снизить работу выхода, так как это обеспечит более интенсивную электронную эмиссию.

ВЫПРЯМЛЕНИЕ

В ряде случаев металл в контакте с полупроводником или полупроводник в контакте с другим полупроводником может обладать односторонней (униполярной) проводимостью. Подобным свойством обладает, например, медная пластинка со слоем закиси меди (Cu_2O). Если медную пластинку прогреть в течение нескольких минут на воздухе при температуре 1 020° С, ее поверхности покроются слоем Cu_2O. Это произойдет потому, что медь, как и большинство других металлов, окисляется. С помощью специально разработанной технологии во время оксидирования меди в печи слой закиси получается только на одной стороне медной пластинки.

При изучении природы униполярной проводимости удалось выяснить, что она обусловливается главным образом существованием в контактирующей системе тонкого, так называемого запорного слоя, обладающего большим омическим сопротивлением. Толщина этого слоя порядка 10^{-5}—10^{-6} *см*. Запорный слой может образовываться как между металлом и полупроводником, так и между двумя полупроводниками. В рассмотренном случае запорный слой формируется в образующемся слое закиси меди вблизи медной пластинки, когда она прогревается в печи.

Если включить эту медную пластинку в электрическую цепь с источником э. д. с., то запорный слой окажет очень большое сопротивление движению электронов из закиси меди в медь и, наоборот, свободно их будет пропускать в обратном направлении. В соответствии с этим одно направление электрического тока называется пропускным (прямым), а другое — запорным (обратным).

Запорные слои бывают трех родов: физические, химические и смешанные. Запорный слой называется химическим тогда, когда он отличается от основной массы полупроводника своим химическим составом. Это отличие может быть не очень резким. Например, запорный слой в меднозакисном выпрямителе имеет химическую природу. Он представляет собой чистую закись меди, в то время как основная толща закиси содержит избыток кислорода. В селеновых

выпрямителях запорный слой также имеет химическую природу и образуется в результате реакции селена с верхним металлическим электродом.

Под химическим запорным слоем разумеют также искусственно нанесенный тонкий слой совершенно постороннего вещества, например шеллака или кварца. Такой слой наносится между полупроводниками и металлом. Впервые подобные слои в выпрямительную технику были введены советским физиком В. П. Жузе.

Физический запорный слой обладает тем же химическим составом, что и полупроводник, но по своим электрическим свойствам он несколько отличается от остальной массы полупроводника. Чаще всего на практике встречаются смешанные слои, представляющие собой некоторое сочетание свойств физических и химических слоев.

В свое время было предложено много теорий, пытавшихся найти обоснование униполярной проводимости контактирующих тел.

Наиболее правильной, повидимому, следует считать теорию выпрямления, согласно которой хорошее выпрямление имеет место тогда, когда контактируют два полупроводника, из которых один обладает дырочным механизмом проводимости, а второй — электронным. Конструкция всех выпрямителей осуществляется таким образом, что металлическая подложка контактирует только с одним полупроводником: закисью меди, селеном, сульфидом меди, германием или кремнием. В каждом выпрямителе всегда осуществляется контакт двух полупроводников с различными механизмами проводимости. Хотя при изготовлении выпрямителя на металл наносится один какой-нибудь полупроводник, но технология изготовления построена таким образом, что между металлом и основным полупроводником возникает сравнительно тонкая прослойка вещества иногда того же самого химического состава, но обладающего уже другим механизмом проводимости.

Рассмотрим процессы, происходящие на контакте дырочного полупроводника с электронным, причем работа выхода электронов из дырочного полупроводника больше работы выхода из электронного полупроводника. При этом условии образующееся контактное электрическое поле, действуя на электроны проводимости электронного полупроводника, удалит их от границы раздела на некоторое расстояние. С другой стороны, то же электрическое контактное поле, действуя на дырки в дырочном веществе, вытолкнет

их по направлению от границы раздела вглубь дырочного полупроводника. В результате этого в рассматриваемой системе возникнет слой толщиной *d*, обедненный носителями электричества. Граница раздела двух полупроводников попадает как раз внутрь этого слоя. Следовательно, слой, обедненный носителями тока, захватывает как часть дырочного полупроводника, так и часть электронного. Удельное сопротивление подобного слоя значительно выше удельного сопротивления прилегающих к нему с одной и с другой стороны полупроводников. Несмотря на незначительную толщину этого слоя (порядка 10^{-5} *см*), его сопротивление во много раз больше суммы сопротивлений электронного и дырочного полупроводников выпрямляющей системы, благодаря чему он выполняет роль запорного слоя. Рассмотрим, как будет вести себя запорный слой во внешнем переменном электрическом поле, т. е. если к системе приложена переменная разность потенциалов. Когда внешнее электрическое поле направлено от электронного полупроводника к дырочному, оно усиливает ранее существовавшее контактное поле, и электроны и дырки еще больше удалятся от границы их раздела, что приведет к увеличению ширины запорного слоя. В связи с этим возрастет также и сопротивление запорного слоя.

Когда знак приложенной разности потенциалов изменится на обратный, внешнее электрическое поле будет направлено от дырочного полупроводника к электронному и ослабит контактное поле, вследствие чего ширина запорного слоя уменьшится. В результате сопротивление запорного слоя резко снизится.

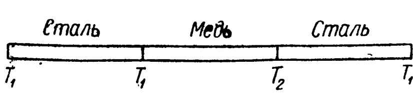
Таким образом, запорный слой выпрямляющей системы, находясь во внешнем переменном электрическом поле, как бы пульсирует, что создает условия, обеспечивающие униполярную проводимость выпрямляющей системы. В этой системе уменьшение сопротивления запорного слоя, когда внешнее электрическое поле, направленное от дырочного полупроводника к электронному, гонит электроны и дырки навстречу друг другу, к границе раздела двух полупроводников, соответствует пропускному направлению. Обратное направление тока соответствует тому случаю, когда внешнее электрическое поле заставляет электроны и дырки двигаться в разные стороны.

Включая выпрямляющую систему в цепь переменного напряжения, можно выпрямлять переменный ток. При этом в течение одного полупериода ток будет протекать через

выпрямитель, а в течение второго полупериода он будет настолько слаб, что практически его можно не принимать во внимание. Отношение тока $I_{пр}$ в пропускном направлении к току $I_{зап}$ в запорном направлении при одной и той же разности потенциалов характеризует выпрямляющие свойства системы и называется коэффициентом выпрямления. Чем выше численное значение коэффициента выпрямления, а также чем больше плотности токов, идущих в пропускном направлении при каком-то определенном напряжении, тем лучше выполняет свои функции выпрямитель. Конечно, эти две величины еще не полностью определяют качество выпрямителя, однако они характеризуют весьма важные его параметры.

ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСТВО ПОЛУПРОВОДНИКОВ

В 1821 г. Зеебек открыл явление, получившее название «термоэлектрического эффекта». Сущность этого явления заключается в возникновении электрического тока в замкнутой цепи, образованной из неодинаковых по составу проводников, при обязательном условии, что места соединения проводников друг с другом имеют различную температуру. Рассмотрим следующий конкретный пример. Составим цепь из двух кусков стальной и куска медной проволоки.



Фиг. 8. Термоэлектрическая цепь.

Если спаять концы этих проволок так, как показано на фиг. 8, то получится разомкнутая цепь, средняя часть которой образована медной проволокой. Пусть температуры концов стальных проволок и первого спая будут иметь одно и то же значение температуры T_1. Если теперь второй спай нагревать до температуры T_2, то на концах стальных проволок возникнет разность потенциалов V, величина которой пропорциональна разности температур $T_2 - T_1$, т. е. $V = \alpha (T_2 - T_1)$.

Если вместо трех проволок спаять только две (стальную и медную) и, как в предыдущем случае, нагревать спай до температуры T_2, а концы проволок поддерживать при температуре T_1, то на концах проволок тоже появится разность потенциалов. При замыкании такой цепи на миллиамперметр последний отметит появление тока, который будет течь непрерывно, если поддерживать разность температур между первым и вторым спаями.

В рассмотренном явлении имеет место непосредственный переход тепловой энергии в электрическую. Несмотря на эту, крайне важную особенность, термоэлектричество на протяжении многих лет оставалось в глазах людей скорее забавным явлением, чем важным фактором, который может быть использован для решения крупных энергетических проблем. «Среди больших открытий Эрстеда, Ампера и Фарадея, — пишет академик А. Ф. Иоффе, — термоэлектричество привлекло мало внимания. В дальнейшем применение его к измерению температур померкло по сравнению с электромагнитами, электрическими машинами и трансформаторами. Так оно и оставалось на задворках физики».

Положение резко изменилось лишь после того, как, начиная примерно с 30-х годов нашего столетия, физики стали усиленно изучать термоэлектрические явления в полупроводниках.

Прежде чем перейти к полупроводникам, рассмотрим, почему разность температур между первым и вторым спаями цепи, составленной из трех металлических проволок, создает разность потенциалов. Сначала рассмотрим более простой случай. Если концы проволок из однородного материала находятся при разных температурах T_1 и T_2, то в этом случае электроны будут перемещаться от более горячего конца проволоки к ее холодному концу в большем числе, чем в обратном направлении. Вследствие этого горячий конец зарядится положительно, а холодный — отрицательно. Появление положительного и отрицательного зарядов на противоположных концах проволоки приведет к появлению электрического поля, направленного от горячего конца проводника к холодному. Так как электроны диффундируют от горячего конца к холодному в большем числе, чем в обратном направлении, что приводит к увеличению накопления положительного и отрицательного объемных зарядов, напряженность электрического поля в свою очередь также возрастает. Несмотря на непрерывно поддерживаемую разность температур, возрастание зарядов на горячем и холодном частях проволоки в конце концов прекратится. Это произойдет потому, что напряженность электрического поля возрастет до такого значения, которое в дальнейшем скомпенсирует силы диффузии. В результате на концах проволоки при данной разности температур T_2—T_1 установится постоянная разность потенциалов.

Несколько сложнее будет в случае двух разнородных металлов.

Выше было отмечено, что возникающая разность потенциалов, или так называемая термоэлектродвижущая сила, пропорциональна разности температур. Отсюда следует, что коэффициент термоэлектродвижущей силы α численно равен величине разности потенциалов, возникающей при разности температур в один градус. Вообще говоря, коэффициент термоэлектродвижущей силы α в свою очередь также зависит от температуры, однако для некоторых пар металлов эта зависимость не сильно выражена.

Для большинства металлов численные значения α в общем малы.

В табл. 3 приводятся значения α для некоторых металлов и сплавов по отношению к платине.

Таблица 3

Значение коэффициента термоэлектродвижущей силы для некоторых металлов и сплавов

Название металла (или сплава)	Символ (и состав)	α, *мкв*/° С
Алюминий	Al	+4
Алюмель	95% Ni+5% (Al, Si, Mg)	—10; —14
Висмут	Bi	—58; —73
Вольфрам	W	+7,9
Железо чистое	Fe	+18
Золото	Au	+8
Иридий	Ir	+6,5
Константан	60% Cu+40% Ni	—35
Копель	56% Cu+44% Ni	—40
Кадмий	Cd	+9
Кобальт	Co	—17
Молибден	Mo	+13
Медь	Cu	+7,6
Манганин	84% Cu+13% Mn+2% Ni+1% Fe	+8
Магний	Mg	+4,1
Нихром	80% Ni+20% Cr	+15; +25
Никель	Ni	—15,2
Олово	Sn	+4,3
Платинородий	90% Pt+20% Rh	+6,4
Платиноиридий	90% Pt+10% Ir	+13
Палладий	Pd	—5,7
Родий	Rh	+6,4
Ртуть	Hg	+0,4
Сурьма	Sb	+48
Свинец	Pb	+4,4
Серебро	Ag	+7,2
Тантал	Ta	+5
Хромель	90% Ni+10% Cr	+29,2
Цинк	Zn	+7

Небольшие численные значения α для всех металлов и явились одной из причин того, что в течение 130 лет с момента открытия явления термоэлектричества оно не нашло энергетических применений. Лишь в термометрии термоэлектрический эффект нашел широкое и заслуженное признание. Коэффициент полезного действия металлических термопар обычно исчисляется сотыми, а в лучшем случае десятыми долями процента. Это объясняется бесполезной тратой значительного количества тепловой энергии, подводимой к нагреваемому спаю, и малым значением α. В металлах концентрация свободных электронов практически остается постоянной в широком температурном диапазоне, а их кинетическая энергия мало зависит от температуры. Поэтому хотя при создании на концах металла разности температур возникают условия для диффузии электронов, но эта диффузия такова, что образующаяся разность потенциалов весьма мала.

Совершенно иная картина наблюдается в полупроводниках. Она настолько выгодно отличается от того, что имеет место в металлах, что стало возможным говорить об осуществлении термоэлектробатарей, непосредственно превращающих тепловую энергию в электрическую со сравнительно большим коэффициентом полезного действия. Как известно, в полупроводниках концентрация носителей электричества при комнатной температуре значительно меньше, чем в металлах. Затем кинетическая энергия носителей тока в полупроводниках растет с повышением температуры сильнее, чем в металлах. В отличие от металлов в полупроводниках концентрация носителей тока быстро возрастает с температурой. Если при абсолютном нуле температуры в зоне проводимости нет ни единого электрона, то даже при комнатных температурах концентрация носителей зарядов может достигать цифры в 10^{20} на 1 *см*^{3}.

Эти важнейшие отличия полупроводников от металлов дают возможность наблюдать во многих полупроводниках термоэлектродвижущие силы, в десятки раз большие, чем в металлах. При этом происходит следующий процесс. Носители электричества, электроны или «дырки» диффундируют из более горячей области полупроводника, в которой как их концентрация, так и их кинетические энергии имеют большие значения в области с пониженной температурой, где их концентрации и кинетические энергии меньше. С другой стороны, происходит перемещение носителей тока и в обратном направлении — от холодного конца к горячему.

Но в самом начале процесса, до момента установления динамического равновесия, число носителей, перемещающихся от горячего конца к холодному, больше, чем в обратном направлении. Это перемещение зарядов приводит к довольно быстрому возникновению избытка положительных зарядов на одном конце полупроводника и избытка отрицательных на его другом конце. Одновременно с увеличением числа зарядов возрастает и разность потенциалов между крайними точками полупроводника. Как и в рассмотренном выше случае с металлом, возрастающее электрическое поле будет замедлять диффузию зарядов от горячего конца к холодному, что в конце концов приведет к равновесному состоянию: потоки зарядов в обоих направлениях сравняются, а возникшая при этом разность потенциалов и будет термоэлектродвижущей силой. В этом процессе с особенной четкостью проявляется дырочный и электронный механизм проводимости полупроводника. Горячий конец дырочного полупроводника заряжается отрицательно, а холодный — положительно, что соответствует диффузии дырок из горячей области в холодную. В электронном веществе наблюдается обратная картина: горячий конец заряжается положительно, а холодный отрицательно, что соответствует диффузии электронов от горячего конца к холодному.

В отличие от металлов коэффициент термоэлектродвижущей силы α у полупроводников значительно больше и может достигать значений, превышающих 1 000 *мкв* на градус.

В соответствии с охарактеризованным процессом ясно, что знак и величина α зависят от механизма проводимости полупроводника. Если вещество обладает электронным механизмом проводимости, α имеет отрицательный знак. Для дырочного вещества α имеет положительный знак. И, наконец, в случае смешанной или собственной проводимости знак и величина α определяются рядом факторов, среди которых главное значение имеют такие факторы, как подвижность и концентрация носителей — дырок и электронов. Поэтому для смешанного полупроводника знак α может быть как отрицательным, так и положительным, а численное значение α, как правило, всегда бывает меньше, чем у полупроводника с одним механизмом проводимости. Иногда он мало отличается от нуля.

Таким образом, определяя знак термоэлектродвижущей силы, можно определить механизм электропроводности испытуемого образца.

Если составить цепь из двух полупроводников — электронного и дырочного и замкнуть ее на какой-нибудь приемник электрической энергии, а затем место контакта нагревать, то в цепи возникнет термоэлектрический ток. При этом термоэлектрические токи I_- и I_+, возникающие в каждой ветви отдельно, складываются, образуя ток пары $I_0 = I_- + I_+$. Коэффициент термоэлектродвижущей силы пары α_0 представляет собой сумму коэффициентов, характеризующих электронную и дырочную ветви, т. е. $\alpha_0 = \alpha_- + \alpha_+$. Тогда полная термоэлектродвижущая сила, возникающая на концах такой пары, будет $\varepsilon = \alpha_0 (T_2 - T_1) = (\alpha_- + \alpha_+)(T_2 - T_1)$. Коэффициент полезного действия превращения тепловой энергии в электрическую с помощью термоэлементов тем больше, чем больше значения удельной электропроводности σ и коэффициента α и чем меньше коэффициент теплопроводности $\varkappa$. Иначе говоря, коэффициент полезного действия $\eta \approx \frac{\sigma\alpha^2}{\varkappa}$.

Сочетания этих трех величин σ, α и $\varkappa$ в полупроводниках имеют более благоприятное значение, чем в металлах.

Удельная электропроводность σ металлов значительно больше электропроводности полупроводников, но зато α в полупроводниках превышает в десятки и даже в сотни раз значение α для металлов. Кроме того, теплопроводность полупроводников во много раз хуже теплопроводности металлов. Все это вместе взятое и приводит к относительно большим значениям коэффициента полезного действия термоэлементов из полупроводников, достигающим в настоящее время 8%.

ЯВЛЕНИЕ ПЕЛЬТЬЕ

В 1834 г. французский физик Жан Пельтье проделал опыт, принесший новое открытие в физике. Он составил цепь, образованную из двух металлических стержней — висмутового и медного, а затем пропускал через эту систему постоянный электрический ток. При этом оказалось, что когда ток был направлен от висмута к меди, в спае повышалась температура на 10° С. При пропускании тока в обратном направлении (от меди к висмуту) наблюдалось понижение температуры спая на 5° С. Составляя цепь из висмута и сурьмы, Пельтье обнаружил еще более разитель-

ный контраст: при токе, направленном от висмута к сурьме, температура спая повышалась на 37° С, а при прохождении тока в обратном направлении тот же спай охлаждался на 45° С.

Явление, открытое Пельтье, было настолько интересным, что петербургский физик Э. Х. Ленц занялся в 1838 г. более обстоятельным его изучением. Это было тем более оправданно, что сам Пельтье давал совершенно неверное объяснение открытому им явлению.

Тщательно исследуя явление Пельтье, Ленцу удалось пропусканием тока через систему из разных металлов настолько понизить температуру одного спая, что находившаяся на спае капля воды замерзла.

Подробное изучение явления Пельтье привело к открытию совершенно четкой закономерности. Оказалось, что количество тепла Q, выделяемое на спае или, наоборот, при обратном направлении тока поглощаемое спаем, пропорционально току I и времени t, т. е. $Q = \Pi I t$, где Π — коэффициент Пельтье, численно равный тому количеству тепла, которое выделяется или поглощается на спае при протекании через него единицы количества электричества. При этом нужно иметь в виду, что речь идет о тепле, выделяемом спаем дополнительно к обычному джоулевому теплу.

Между коэффициентом Пельтье Π и коэффициентом термоэлектродвижущей силы α существует соотношение; эти величины пропорциональны друг другу. Следовательно, так же как и в случае термоэлектрических явлений, эффект Пельтье особенно ярко проявляется при контакте двух полупроводников, а не металлов. Так же как и термоэлектричество, которое не играло никакой роли в энергетике, пока не были созданы полупроводниковые термоэлементы, явление Пельтье начинает находить серьезное практическое применение лишь в наше время.

ФОТОПРОВОДИМОСТЬ

В то время как в металлах проводимость наблюдается при различных температурах, проводимость полупроводников в обычных условиях возникает только благодаря тепловому движению. Однако можно создать такие условия, которые обеспечивают появление проводимости в полупроводнике и без повышения его температуры. Так как электропроводность полупроводника возникает лишь вследствие того, что электроны попадают в зону проводимости, то до-

статочно сообщить электронам энергию, необходимую для переброса их в свободную зону, чтобы возникла проводимость. Эту энергию в обычных условиях электроны получают от участвующих в тепловом движении других частиц, но энергия может тоже поступить извне, в частности, например, в виде излучения.

Еще в прошлом столетии было обнаружено, что сопротивление селеновой палочки резко меняется в зависимости от ее освещения. Тщательные исследования показали, что сопротивление селена уменьшается при освещении.

Позднее удалось установить, что этим свойством обладает не только селен, но и некоторые другие полупроводники. Появление квантомеханических представлений дало возможность объяснить это явление, получившее в науке название фотопроводимости или внутреннего фотоэффекта.

Физическая природа фотопроводимости заключается в следующем. При некоторой температуре в затемненном полупроводнике какое-то число электронов n находится в свободной зоне. Эти электроны обусловливают обычную электропроводность вещества, иначе называемую темновой. Если после этого полупроводник будет подвергнут освещению, то в свободной зоне, помимо уже существовавших там ранее «темновых» электронов, появится новое число n_1 «световых» электронов и общее число электронов в зоне станет равным $n + n_1$. Электропроводность в связи с этим возрастет и станет равной

$$\sigma = neu + n_1 e u_1,$$

где первое слагаемое отвечает темновой проводимости, а второе — фотопроводимости.

Из самых общих представлений о природе полупроводников становится совершенно ясной причина появления в свободной зоне фотоэлектронов. Несомненно, что поставщиком как темновых, так и световых электронов у беспримесного полупроводника является заполненная зона. Понятно, что и те и другие электроны попали в свободную зону лишь потому, что получили энергию, необходимую им для преодоления запрещенной зоны „шириной“ ΔE. Следовательно, фотопроводимость возникла за счет того, что падающие на поверхность полупроводника и поглощенные им фотоны отдали фотоэлектронам всю свою энергию. Каждый фотон несет энергию $h\nu$. Если эта энергия по величине больше энергии ΔE или, по крайней мере, равна ей, то электрон из заполненной

зоны сможет перейти в зону проводимости. Отсюда вытекает непременное следствие: фотопроводимость возможна тогда, когда $h\nu \geqslant \Delta E$. Таким образом, для каждого фоточувствительного вещества существует своя граница фотопроводимости, отвечающая условию

$$h\nu_0 = \Delta E.$$

Если частота ν падающего на полупроводник излучения меньше ν_0, то фотопроводимость не возникает. Только излучение с частотой $\nu \geqslant \nu_0$ способно создать фотопроводимость.

Граница фотоэффекта, т. е. величина ν_0, зависит от самого полупроводника, в котором наблюдается фотоэффект, от того, беспримесный он или нет.

Фотопроводимость, или внутренний фотоэффект, возникает далеко не во всех полупроводниках. Независимо от этого непременным условием появления фотопроводимости является поглощение веществом падающего на него излучения. Только в этом случае может в принципе возникнуть фотоэффект.

Опытами советских физиков было установлено, что по своему поведению фотоэлектроны ничем не отличаются от тепловых электронов вплоть до практически полного совпадения их подвижностей.

Тщательное изучение внутреннего фотоэффекта показало, что изменение сопротивления в разных веществах возникает под действием излучения различного спектрального состава: у одних веществ оно наблюдается тогда, когда вещество «освещено» ультрафиолетовыми лучами, у других — при освещении видимыми или инфракрасными лучами.

Освобожденные светом электроны в течение очень короткого промежутка времени находятся в свободной зоне. За это время они блуждают в межатомных промежутках и при наличии разности потенциалов между двумя точками полупроводника перемещаются преимущественно в одном направлении, образуя, таким образом, электрический ток. Затем фотоэлектроны переходят на более низкие уровни примесей или же в заполненную зону. Однако при непрерывном освещении полупроводника появляются все новые и новые фотоэлектроны, и за это же время какое-то их число возвращается назад. В результате устанавливается динамическое равновесие, т. е. число возникающих фотоэлектронов становится равным числу электронов, возвращающихся обратно.

В свободном состоянии фотоэлектроны находятся чрезвычайно малое время (порядка от 10^{-3} до 10^{-7} сек.). Но в этот короткий промежуток «времени жизни» они являются полноценными электронами проводимости. Полупроводниковые вещества значительно повышают свою электропроводность не только под действием излучения. Любая другая частица, попадающая в атом и отдающая при этом электрону всю свою энергию, в принципе способна перевести электрон в свободное состояние. И действительно, многочисленные, неоднократно повторенные опыты показали, что проводимость возникает и в том случае, когда поверхность вещества бомбардируется быстрыми электронами, альфа-частицами, протонами, дейтонами и другими частицами. Понятно, что для этого энергия бомбардирующей частицы должна быть больше энергии перевода электрона в свободное состояние.

В полупроводниках концентрация электронов проводимости при комнатной температуре значительно меньше, чем у металлов, а число появляющихся под действием света фотоэлектронов относительно велико. При соответствующем освещении в некоторых веществах, как, например, в сернистом кадмии (CdS), число фотоэлектронов может на четыре порядка превышать число темновых электронов проводимости. В других же менее фоточувствительных веществах число фотоэлектронов даже не при слишком интенсивном излучении может достигать 20—30% от общего числа электронов проводимости. Это свойство некоторых полупроводников делает их весьма важными и необходимыми материалами.

ФОТОЭФФЕКТ ЗАПОРНОГО СЛОЯ

В предыдущем параграфе было показано, что под действием поглощенного света электроны могут переходить из заполненной зоны в свободную, создавая таким образом фотопроводимость. При этом в полупроводнике возникает лишь дополнительная проводимость, но не образуется никаких собственных электродвижущих сил. Однако известно и другое явление — появление электродвижущих сил в результате освещения полупроводника. Например, если подвергнуть полупроводник неравномерному освещению так, чтобы одни части образца освещались значительно сильнее, а другие значительно слабее, можно в ряде случаев обнаружить некоторую разность потенциалов между светлыми и темными участками. Это явление объясняется тем, что в

момент освещения электроны начинают диффундировать из освещенных участков в темные в большем числе, чем в обратном направлении. Такая преимущественная диффузия приводит к тому, что темные участки в случае электронного механизма проводимости постепенно заряжаются отрицательно, а светлые — положительно. Вследствие этого внутри полупроводника образуется постепенно нарастающее электрическое поле, которое в конце концов установит равновесное состояние, характерное тем, что электронные потоки в ту и другую сторону сравняются. Когда наступит равновесие, между светлым и темным участками полупроводника будет существовать некоторая разность потенциалов, доходящая иногда до 0,2 *в*.

Однако самое интересное проявление воздействия света на полупроводник заключается в существовании так называемого фотоэффекта запорного слоя. Окислим медную пластинку, образовав на ней слой закиси меди Cu_2O, которая является классическим полупроводником. Нанесем на поверхность закиси меди очень тонкий слой металла, например серебра. Известно, что очень тонкие металлические слои полупрозрачны. Затем составим простую электрическую цепь. К полупрозрачному серебряному электроду подведем провод от одного зажима гальванометра, второй зажим которого соединим с медной пластинкой. Эта схема характерна тем, что в ней нет источника тока. Если направить на верхний полупрозрачный серебряный электрод поток света, то стрелка гальванометра уйдет далеко вправо от своего нулевого положения, так как в цепи пойдет ток. Это явление обусловливается существованием в системе металл — полупроводник запорного слоя.

В рассматриваемом случае электроны под действием света переходят из закиси меди сквозь запирающий слой в медь. Следовательно, медная пластинка заряжается отрицательно, а полупрозрачный электрод положительно. Таким образом, облучение светом меднозакисной поверхности вызывает в цепи появление электрического тока. Аналогичное явление наблюдается и у других полупроводников. Особенно ярко этот эффект проявляется в системах, включающих такие полупроводники, как сернистый таллий, сернистое серебро, селен, германий, кремний, сернистый кадмий.

Явление возникновения электродвижущей силы или электрического тока под действием света в системах, состоящих из электронного и «дырочного» полупроводников, запорного слоя и металлических электродов, получило на-

звание фотоэффекта запорного слоя или вентильного фотоэффекта.

Какова природа вентильного фотоэффекта? Механизм этого явления складывается из нескольких этапов. Первый этап заключается в том, что поглощенный свет освобождает в полупроводнике одновременно электроны и дырки, образуя так называемые пары «электрон-дырка». Освобождение пар сводится к тому, что электроны из заполненной зоны перебрасываются в свободную зону, становясь, таким образом, электронами проводимости, а дырки остаются в заполненной зоне и получают также возможность участвовать в электропроводности.

Если бы свет поглощался в каком-нибудь одном полупроводнике, не контактирующим с другим полупроводником, то возникшие под действием света пары увеличили бы лишь проводимость данного полупроводника и на этом бы все дело и кончилось. Совсем иное имеет место в рассматриваемой нами системе, состоящей из полупроводников с электронной проводимостью (обозначаемых буквой *n*) и дырочной проводимостью (обозначаемых буквой *p*). Между обоими полупроводниками заключен запирающий слой. Контакт *p* и *n* полупроводников приводит к образованию между ними контактного электрического поля. И если работа выхода «дырочного» полупроводника больше работы выхода электронного, что обязательно для двух полупроводников одного и того же химического состава, то это контактное электрическое поле направлено от электронного полупроводника к «дырочному». Что же произойдет в этом случае с парами? Очевидно, что «освобожденные» светом неосновные носители тока, т. е. электроны в дырочном полупроводнике или дырки в электронном, под действием этого поля будут через запирающий слой переходить из одного полупроводника в другой. По мере перехода неосновных носителей тока из одного полупроводника в другой будет увеличиваться их накопление в одной части рассматриваемой системы, в то время как в другой части будет происходить накопление основных носителей тока. Таким образом, образованные светом пары начнут разделяться: электроны концентрироваться в электронном полупроводнике, а дырки — в дырочном. Это накопление не может продолжаться беспредельно потому, что параллельно с возрастанием концентрации дырок в «дырочном» полупроводнике и электронов — в электронном возрастает создаваемое ими электрическое поле, которое препятствует переходу

неосновных носителей из одного полупроводника через запирающий слой в другой полупроводник. Вместе с тем по мере возрастания этого поля возрастает и обратный поток неосновных фотоносителей. В конце концов наступит динамическое равновесие, когда число неосновных носителей, перемещающихся за единицу времени через запирающий слой, сравняется с числом тех же носителей, перемещающихся за тот же самый промежуток времени в обратном направлении. В этот момент между верхним и нижним электродами установится некоторая окончательная разность потенциалов, которая по существу и будет представлять собой фотоэлектродвижущую силу.

Говоря об установлении подобного динамического равновесия, следует иметь в виду, что число неосновных фотоносителей N, перемещающихся за единицу времени из освещаемого полупроводника через запирающий слой в другой полупроводник, зависит от интенсивности светового потока. С увеличением интенсивности светового потока увеличивается численное значение N. Сначала это увеличение идет по лийнейному закону, а затем возрастание N начинает все больше и больше отставать от возрастания интенсивности светового потока до тех пор, пока не наступает полное насыщение. В соответствии с изменением N в зависимости от изменения светового потока изменяется и величина фотоэлектродвижущей силы, которая в конечном счете и представляет в этом явлении главный интерес.

Таков в самых общих чертах механизм возникновения фотоэлектродвижущей силы в системе, состоящей из p и n полупроводников и заключенного между ними запирающего слоя.

Вентильный фотоэффект особенно активно протекает в полупроводниковых системах с большой диффузионной длиной «неосновных» носителей тока и соответственно большим временем их жизни.

Проследим за поведением какого-нибудь неосновного носителя тока, предположим, электрона в „дырочном" полупроводнике. После своего „рождения" в точке K полупроводника электрон будет пребывать в свободном состоянии некоторое время τ, которое и есть „время жизни" электрона. В течение этого промежутка времени электрон испытает большое число столкновений с какими нибудь другими электронами или атомами. Путь, проходимый электроном от одного столкновения до другого, называется **длиной свободного пробега**. Обозна-

чим его через Δl. За время τ электрон будет двигаться по какому-то извилистому пути, по ломаной линии, состоящей из отрезков длиной Δl. В принципе эти отрезки могут быть неравны друг другу. Длина этой извилистой траектории l складывается из суммы длин свободного пробега, т. е. $l = \Sigma \Delta l$.

По истечении промежутка времени τ, попав в точку M полупроводника, электрон рекомбинирует. Рекомбинация заключается в том, что электрон снова попадает на какой-нибудь незанятый уровень заполненной зоны. Однако до момента рекомбинации электрон за время τ успеет переместиться на расстояние L, соответствующее длине по прямой линии от точки K до точки M. Это расстояние L получило название диффузионной длины неосновных носителей тока. Из чисто теоретических соображений получается, что $L = \frac{1}{6} l$.

Диффузионная длина неосновных носителей тока L, так же как и время их жизни τ, являются весьма важными параметрами полупроводника.

Из рассмотрения механизма возникновения вентильной фотоэлектродвижущей силы видно, что электрод, непосредственно контактирующий с электронным полупроводником, всегда заряжается отрицательно, в то время как электрод, непосредственно контактирующий с дырочным полупроводником, заряжается положительно. Поэтому у разных типов вентильных фотоэлементов верхний полупрозрачный электрод может приобретать как положительный заряд, так и отрицательный.

Открытие фотоэффекта запорного слоя расширило возможности практического использования полупроводников и легло в основу устройства вентильных фотоэлементов — приборов, прямым и непосредственным путем преобразующих лучистую энергию в электрическую.

ГЛАВА ВТОРАЯ

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ И УСИЛИТЕЛИ

СЕЛЕНОВЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ

Селеновый элемент является одним из первых твердых выпрямителей переменного тока. Нелинейность его характеристик была обнаружена еще в 1876 г. Однако первые про-

мышленные образцы селеновых выпрямителей появились лишь в 1924 г.

В настоящее время селеновые выпрямители широко применяются в технике и выпускаются в больших количествах во всех странах мира.

Для получения доброкачественных выпрямителей применяют химически чистый селен (99,99%). Селен — элемент, находящийся в VI группе периодической системы и обладающий полупроводниковыми свойствами. Его порядковый номер 34, а атомный вес 78,96. По своим химическим свойствам селен походит на серу. Для изготовления селеновых выпрямительных шайб применяют аморфный селен, который затем температурной обработкой переводится в β-модификацию, имеющую кристаллическую структуру.

Технология изготовления селеновых выпрямительных шайб несложна и заключается в следующем. Из мягкой стали типа Армко штампуют круглые диски, служащие нижним электродом выпрямителя. Диаметр диска определяется будущим типом выпрямителя, т. е. силой тока, текущего через шайбу. Обычно стандартными размерами являются диски диаметром 5, 7, 18, 25, 35, 45, 60, 80, 100, 112 *мм*. Диски имеют толщину от 0,8 до 1 *мм*. В центре диска пробивается отверстие для пропуска через него сборочного болта.

Отштампованные диски промываются и подвергаются обработке пескоструйным аппаратом для того, чтобы поверхности их стали шероховатыми. Затем диски никелируются. При этом слой никеля получается тоже шероховатым и к нему потом хорошо пристает селен. Для нижнего электрода нельзя применять любой металл. Экспериментальные работы показали, что оптимальные результаты получаются, если для нижнего электрода выбрать железо, покрытое никелем. Другие металлы в контакте с селеном дают химические соединения значительного сопротивления, что сказывается на величинах пропускных токов. Кроме того, у выпрямительных шайб, изготовленных не из железа и никеля, а из других металлов, гораздо сильнее проявляется процесс старения, т. е. ухудшение с течением времени выпрямляющих свойств.

После того как железные диски отникелированы, их кладут на горячую плиту и прогревают в течение 3—5 мин. при температуре 230—250° С. Затем палочкой из аморфного селена промазывают поверхность дисков. При соприкосновении с нагретыми дисками твердый, аморфный селен пла-

вится и ложится на поверхность дисков. При этом слой получается недостаточно ровный. Далее диски снимаются с плиты и охлаждаются. Для получения слоя селена одинаковой толщины по всей поверхности диски с нанесенным на них селеновым слоем прессуются при температуре порядка 130° С и давлении в 10 *кг/см*^{2}. Так как прессовка производится при температуре свыше 100° С, селен размягчается, частично выдавливается и покрывает диск ровным слоем толщиной 0,1 *мм*. Процесс прессовки производится в течение 7—12 мин.

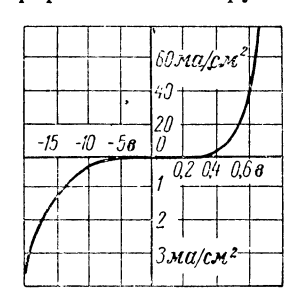
В аморфной модификации селен имеет удельное сопротивление примерно 10^8 *ом · см*. Ясно, что такое сопротивление будет ограничивать величину прямого тока. Поэтому специальными технологическими операциями снижают это сопротивление. Первое снижение происходит при только что описанной опрессовке, при которой аморфный селен переходит в β-модификацию, обладающую кристаллической структурой с сопротивлением 10^5 *ом · см*. Далее диски помещают на 1,5—2 часа в термостат, в котором поддерживается температура в 215° С. Эта операция снижает удельное сопротивление селена до 10^4—10^3 *ом · см*.

Описанный способ нанесения селена на нижний электрод, конечно, не единственный, существуют и другие способы. Затем на поверхность селена наносится верхний металлический электрод. Материал верхнего электрода также имеет существенное значение. Наилучшие результаты дает, в частности, сплав: Bi — 53% (висмут), Cd — 24% (кадмий) и Sn — 23% (олово). Этот сплав имеет весьма невысокую температуру плавления, приблизительно 105° С, что позволяет наносить его методом пульверизации. В специальном аппарате расплавленный металл подается в сопло и струей сжатого воздуха захватывается и разбрызгивается мельчайшими частичками, которые оседают на поверхности селена.

Когда все эти технологические операции по изготовлению выпрямительной шайбы закончены, она подвергается формовке, которая заключается в том, что в течение примерно получаса пропускается в обратном направлении ток с постепенным повышением напряжения. Во время формовки запорный слой приобретает окончательные свои свойства и стабилизируется. Формовка хотя и снижает несколько прямой ток, но зато одновременно резко уменьшает обратный. Таким образом, формовка заметно улучшает электрические свойства выпрямительной шайбы. Описанный режим фор-

мовки дает лишь общее и принципиальное представление об этой заключительной стадии изготовления выпрямляющей шайбы.

В селеновых выпрямителях запорный слой создается постепенно, после того, как на поверхности селена нанесен верхний электрод. Этому помогает формовка. В процессе формовки на наружной поверхности селена возникает тонкий слой селенистого кадмия, который обладает электронным механизмом проводимости. Так как верхний электрод представляет собой тройной сплав, в который входит и кадмий, то последний во время формовки и вступает в более активную реакцию с селеном. Таким образом, селеновый выпрямитель по существу является сложной системой. В этой системе непосредственно контактирует дырочный селен с селенистым кадмием, обладающим электронным механизмом проводимости, а между ними возникает запорный слой, определяющий в значительной степени характер вольтамперной характеристики селенового выпрямителя.



Фиг. 9. Статическая вольтамперная характеристика селенового выпрямителя.

На фиг. 9 представлена вольтамперная характеристика стандартной селеновой шайбы. Пропускное направление у всех селеновых выпрямителей соответствует плюсу на нижнем электроде и минусу — на верхнем, что отвечает дырочному механизму проводимости селена.

По своим электрическим свойствам обычно селеновые выпрямительные шайбы, выпускаемые промышленностью, обладают следующими параметрами: обратное пробивное напряжение (напряжение, при котором выпрямитель пробивается и выходит из строя) порядка 30 *в*; обратное максимальное рабочее напряжение 18 *в*; падение напряжения на шайбе в прямом направлении и при минимальной нагрузке в статическом режиме должно быть не больше 1,3 *в*. Допустимая нагрузка по току в прямом направлении должна быть порядка 50 *ма/см*².

Отдельные выпрямительные шайбы собираются в столбики, которые можно соединять последовательно, параллельно или по смешанной схеме. Группа соединенных столбиков или даже один столбик образуют выпрямительный агрегат.

Повышение коэффициента полезного действия может быть достигнуто путем снижения толщины полупроводникового слоя, что связано с серьезными технологическими трудностями. Снижение толщины полупроводниковых слоев должно быть ограниченным, так как толщина запорного слоя не может быть много меньше 10^{-5} *см*. В противном случае запорный слой перестанет выполнять свое назначение.

Заманчивым является путь создания выпрямителей из новых полупроводниковых материалов с меньшими удельными сопротивлениями, чем селен или закись меди. Однако и здесь существуют свои ограничения, так как толщина запорного слоя находится в прямой связи с удельным сопротивлением полупроводника

$$d = B\sqrt{\rho},$$

где d — толщина запирающего слоя; B — постоянный коэффициент порядка 10^{-7} $см^{1/2} \cdot ом^{-1/2}$; ρ — удельное сопротивление полупроводника.

Селеновые выпрямители имеют широкое распространение и применяются во многих областях техники.

Так как сопротивление полупроводника довольно сильно зависит от температуры, то и режим работы селенового выпрямителя тоже должен зависеть от температуры. И действительно, с понижением температуры окружающей среды внутреннее сопротивление селенового выпрямителя повышается, что вызывает увеличение падения напряжения на вентиле, а следовательно, и снижение его к. п. д. Чрезмерное увеличение температуры также недопустимо, так как перегрев может привести к гибели выпрямительной шайбы. Селеновый выпрямитель работает нормально при окружающих температурах от —45 до +75° С. При работе выпрямителя в условиях повышенной температуры следует охлаждать его, например путем воздушной обдувки.

Выпрямительные селеновые шайбы с течением времени «стареют», т. е. в процессе работы постепенно увеличивается сопротивление селеновой шайбы в прямом направлении и уменьшается в обратном. Старение приводит к уменьшению коэффициента выпрямления и к. п. д. С повышением температуры окружающей среды процесс старения протекает более быстро. Если выпрямитель работает при небольших нагрузках и комнатной температуре, процесс старения заканчивается в первые 4 000 час. работы и затем его выпрямляющие свойства становятся более стабильными.

Срок службы селеновых выпрямителей достаточно высок. С учетом старения селеновый выпрямитель может работать до 40 000 час. При этом его сопротивление в прямом направлении увеличивается в 1,5 раза. Период, в течение которого прямое сопротивление шайбы возрастает в 1,5 раза, принято называть условным сроком службы. В конце условного срока службы старение селеновых выпрямителей практически прекращается и они продолжают работать с ухудшенными электрическими параметрами.

Селеновые выпрямители, как, впрочем, и все полупроводниковые выпрямители, набранные из пластин, обладают значительной собственной емкостью порядка 0,02 *мкф/см²*, ограничивающей их применение в высокочастотных схемах. Поэтому селеновые выпрямители нашли широкое применение для выпрямления только токов низкой частоты.

Несмотря, однако, на ряд недостатков, селеновые выпрямители успешно конкурируют с электронными выпрямителями — кенотронами и газотронами, мотор-генераторами и другими видами преобразователей. Основными преимуществами селеновых выпрямителей являются относительное высокое значение к. п. д., простота изготовления, отсутствие накальных цепей, сравнительно малые габариты, большие сроки службы и др.

МЕДНОЗАКИСНЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ

Меднозакисные, или купроксные, выпрямители также нашли широкое распространение. Одним из условий получения высококачественных купроксных выпрямителей, помимо правильной технологии, является применение особо чистой меди.

Из медной пластины толщиной 1 *мм* штампуются диски нужных размеров с небольшим отверстием в центре для пропуска через него сборочного болта. Отштампованные диски тщательно очищаются и подвергаются (для полного обезжирения меди) основательной промывке в 30% растворе едкого натра и затем в проточной воде. Обработанные едким натром диски опускаются на 15 сек. в концентрированную азотную кислоту, после чего 3—5 мин. моются в проточной, лучше всего дистиллированной воде. Вслед за мытьем следует сушка дисков на фильтрованной бумаге или в термостате. Для улучшения электрических параметров будущих выпрямителей рекомендуется вслед за сушкой подвергнуть диски трехчасовому отжигу при температуре 600° С в вакууме.

Затем следует главная операция, которая заключается в том, что вымытые и высушенные диски попарно укладываются на подставку из жароупорной стали, которая вводится в электрическую печь, нагретую до температуры 1 020—1 040° С. Температура печи тщательно контролируется с помощью термопары. Диски бóльших диаметров вводятся в печь не на металлической подставке, а нанизанными на стальной стержень.

В печи все наружные стороны медных дисков через 10—15 мин. покрываются слоем закиси меди (Cu_2O) толщиной приблизительно 0,1 *мм*. Внутренние стороны дисков, обращенные к металлической подставке, практически не окисляются благодаря затрудненному доступу кислорода к их поверхности. Собственно говоря, при такой системе укладки диски, непосредственно лежащие на металлической подставке, являются лишь своеобразными подкладками. Они специально предназначены для этой цели и служат долгое время.

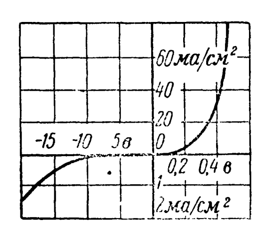
Во время оксидирования необходим особенно тщательный и точный контроль температуры печи, так как медь плавится при температуре 1 080° С и сравнительно небольшой перегрев приводит к расплавлению медных дисков.

Электрические свойства Cu_2O в сильной степени зависят от последующего процесса охлаждения дисков. Для получения оптимальных результатов горячие диски вынимаются из печи и очень быстро переносятся в другую, рядом стоящую печь. Во второй печи обеспечивается постепенный переход от температуры оксидирования к более низкой температуре, при которой устанавливается наивыгоднейшее распределение примесей в толще Cu_2O. Поэтому температура этой печи и время выдержки в ней купроксных дисков влияют на величины прямых и обратных токов. Температура второй печи обычно колеблется в пределах от 450 до 600° С. Во второй печи диски выдерживаются в зависимости от их размеров от 8 до 15 мин., после чего они сразу же охлаждаются холодной проточной водой.

Во время нахождения дисков во второй печи на слое закиси меди образуется плохо проводящий слой окиси меди (CuO), который удаляется при погружении дисков на 3—5 мин. в 30% раствор азотной кислоты (HNO_3). Затем диски промываются и сушатся. Изготовление верхнего электрода осуществляется разными способами. Приведем один из них. Приготовляется 7,5% раствор шеллака в этиловом спирте. К 70 весовым частям шеллачного раствора

добавляется 30 весовых частей тонкого графитового порошка. Вся смесь тщательно растирается и ею покрывается поверхность закиси меди диска. После просушки на графитовый слой наносится методом пульверизации металлический слой.

Если к приготовленной описанным выше способом купроксной шайбе приложить напряжение, т. е. составить цепь из аккумулятора, амперметра и выпрямительной пластины, то через шайбу пойдет заметный ток лишь в одном (прямом) направлении. В обратном направлении сила тока будет гораздо меньше. Прямое направление соответствует минусу на меди, т. е. на нижнем электроде, и плюсу — на верхнем электроде. Это значит, что в прямом направлении электроны движутся из меди в закись меди интенсивным потоком, а в обратном направлении при тех же напряжениях число перемещающихся электронов за единицу времени будет значительно меньше.



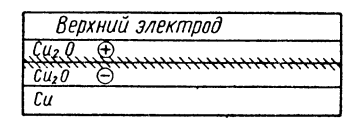
Фиг. 10. Статическая вольтамперная характеристика купроксного выпрямителя.

На фиг. 10 представлена вольтамперная характеристика типичной выпрямляющей меднозакисной пластины.

В отличие от селеновых выпрямителей, у которых запирающий слой находится вблизи верхнего электрода, в купроксной пластине запирающий слой расположен вблизи нижнего электрода. Процесс его образования происходит следующим образом. Во время оксидирования медного диска в первой печи и последующего охлаждения его во второй, возникающий слой закиси меди по своим электрическим свойствам получается неоднородным. Закись меди, непосредственно прилегающая к меди, насыщается медью. Это значит, что в некоторой толще Cu_2O существуют примеси атомов меди, сообщающие ей электронный механизм проводимости. Наружные слои закиси имеют примеси атомов кислорода, сообщающие ей дырочный механизм проводимости. Таким образом, весь слой закиси меди по существу представляет собой своего рода слоеный пирог, состоящий из дырочной и электронной частей, а между ними образуется запорный слой, обусловливающий униполярную проводимость (фиг. 11).

В подобной конструкции выпрямителей используется лишь одна сторона пластины, а вторая выполняет роль вы-

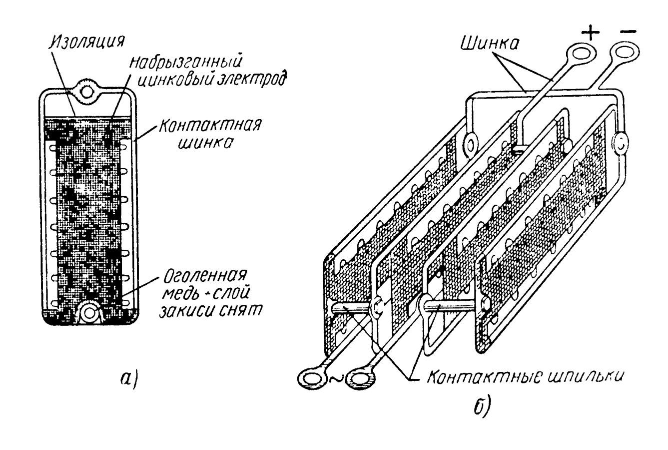
вода. В настоящее время изготовляются выпрямители из двухсторонних меднозакисных пластин. Обычно из таких пластин собираются выпрямители на большие токи. Методика изготовления таких пластин такова: медная заготовка вводится в печь, где окисление производится одновременно с двух сторон. Конструкции двухсторонних пластин и вентильной группы приведены на фиг. 12.



Фиг. 11. Схематическое строение купроксного выпрямителя (заштрихованная область— запорный слой).

Меднозакисные выпрямительные шайбы или пластины собирают в столбики. В зависимости от назначения выпрямителя столбики собираются в группы с последовательным, параллельным или смешанным соединением.

Изготовленные описанным способом меднозакисные выпрямляющие пластины, будучи включены в электрическую

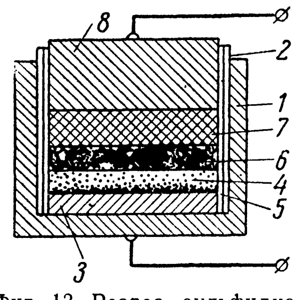


Фиг. 12. Купроксная двухсторонняя пластина (*а*) и купроксная вентильная группа из двухсторонних пластин (*б*).

схему, с течением времени стареют. Для того чтобы купроксные пластины были бы более устойчивы в работе, их подвергают искусственному старению. Для этого меднозакисные пластины сразу же после изготовления помещают в термостат, в котором их выпрямляющие свойства стабилизируются.

СУЛЬФИДНЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ

В начале 40-х годов наша промышленность начала выпускать новый тип твердого полупроводникового выпрямителя из сернистой меди, названного сульфидным. Для его изготовления приготовляется алюминиевый стаканчик, на дно которого помещается магниевый диск толщиной от 1,5 до 2 *мм*. Стенки стаканчика изолируются слюдяной прокладкой, а внутрь его засыпается примерно 1 *г* порошка смеси, состоящей из 60 весовых частей сернистой меди (CuS), 25 весовых частей серы и 15 частей порошкообразного шамота. Затем в стаканчик вставляется металлический пуансон и при помощи пресса полупроводниковый порошок медленно сдавливается до тех пор, пока прессующая сила не достигнет 5 000 *кг*. Во время прессовки через стаканчик со смесью пропускается переменный ток напряжением от 12 до 14 *в*, формующий будущий выпрямитель. Так как сернистая медь обладает довольно хорошей проводимостью, то при этих напряжениях и принятых размерах площади дна стаканчика формующий ток достигает значений до 100 *а*.



Фиг. 13. Разрез сульфидного выпрямителя.

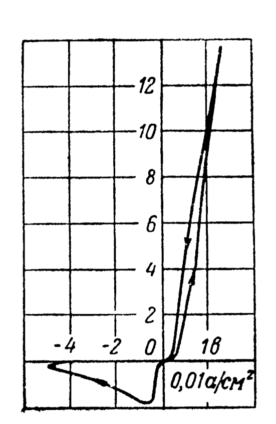
1 — алюминиевый стаканчик; *2* — слюдяная прокладка; *3* — магниевый диск; *4* — полупроводниковая смесь; *5* — запорный слой; *6* — слой CuS; *7* — графитовая шайба; *8* — алюминиевая пробка.

Во время прессовки под током спрессованная в таблетку полупроводниковая смесь приваривается к магниевому диску. Весь процесс длится примерно 10 мин. Затем пуансон вынимают и засыпают внутрь стаканчика еще некоторое количество порошкообразной сернистой меди с таким расчетом, чтобы на один квадратный сантиметр рабочей площади выпрямителя приходилось примерно 1—1,2 *г* полупроводникового порошка. Поверх засыпанного порошка закладывается шайба из твердого графита, которая зажимается сверху алюминиевой пробкой (фиг. 13). Собранный таким образом выпрямитель снова помещается под пресс, где опять происходит прессовка под током, но в отличие от первой операции давление не превосходит 2 500 *кг*. Формующее напряжение также снижается с 12—14 до 8—10 *в*. Как и в первом случае, процесс длится примерно 10 мин.

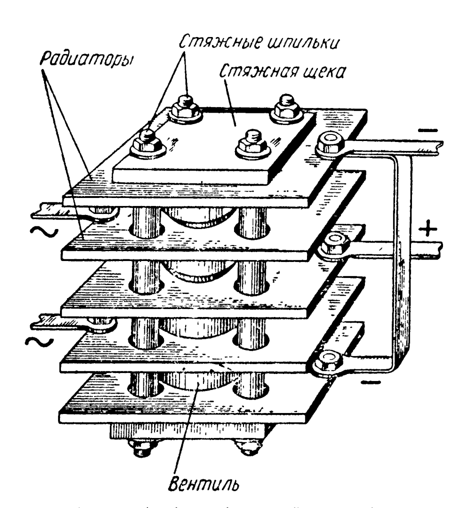
Во время прессовок под током в зоне, близкой к магниевому диску, образуется запорный слой. Предполагается, что

во время формовки, сопровождающейся разогревом капсулы, происходит реакция CuS с магнием, в результате чего прилегающий к магниевому диску слой полупроводника меняет механизм своей электропроводности. Поэтому и здесь имеет место контакт электронной сернистой меди с дырочной, а следовательно, возникновение между ними запорного слоя.

Сульфидные выпрямители рассчитаны на небольшие напряжения и значительные плотности токов, доходящие до



Фиг. 14. Вольтамперная характеристика сульфидного выпрямителя.



Фиг. 15. Сульфидный столбик.

10 $a/cм^2$. По сравнению с селеновыми и меднозакисными выпрямителями их к. п. д. заметно меньше и не превосходит 65%. Сульфидные выпрямители более чувствительны к влажности, чем селеновые.

Срок службы выпрямителей в значительной мере определяется режимом их эксплуатации. При нормальной эксплуатации, когда нагрев капсул не превышает 90° С, выпрямитель может служить в течение нескольких тысяч часов.

На фиг. 14 изображена вольтамперная характеристика сульфидного элемента.

Подобно ранее описанным типам выпрямителей сульфидные элементы собираются в столбики (фиг. 15), соединенные последовательно, параллельно или в смешанные груп-

пы. Столбик, изображенный на фиг. 15, дает возможность получить выпрямленный ток в 40 *а*. Несмотря на невысокий к. п. д., применение сульфидных выпрямителей в ряде областей вполне оправдано.

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДИОДЫ

Еще на заре радиотехники кристаллический детектор играл серьезную роль, так как обеспечивал преобразование принимаемых сигналов. Для детектирования в то время применялись естественные кристаллы: галенит, пирит, цинкит, оловянный камень, карборунд, арсенопирит, медный колчедан и др.

Конструктивно кристаллический детектор состоял из металлической чашечки с впаянным в нее детектирующим кристаллом и подвижной контактной пружинки с заостренным концом. При работе с таким детектором всегда приходилось искать на кристалле чувствительную точку, что было очень неудобно.

С появлением электронных ламп кристаллические детекторы были вытеснены и временно потеряли свое значение. Однако с освоением диапазона сантиметровых волн кристаллические детекторы стали успешно конкурировать с электронной лампой, применение которой ограничивается инерцией электронов на этих частотах и влиянием междуламповых емкостей. Появились новые конструкции кристаллических детекторов, свободные от прежних недостатков и пригодные для работы на сверхвысоких частотах. Исторически первыми были кремниевые детекторы, затем были созданы германиевые детекторы с высокими обратными напряжениями.

Германий — химический элемент, обладающий полупроводниковыми свойствами. Он находится в IV группе периодической системы Менделеева. Его порядковый номер 32, а атомный вес 72,6. По своим химическим свойствам германий близок к углероду и кремнию. Германий имеет кристаллическую решетку, типа алмазной. Температура его плавления 958° С, плотность 5,35 *г/см*^{3}, а удельная электропроводность σ лежит в широких пределах, занимающих, по крайней мере, пять порядков: от 10^3 до 10^{-2} *ом*$^{-1}$ · *см*$^{-1}$. Такой широкий диапазон значений σ объясняется, как и для всех полупроводников, влиянием концентрации и типа введенных в решетку примесей. Влияние примесей на электрические свойства германия настолько велико, что один атом примеси на 10^8—10^9 атомов германия уже увеличивает зна-

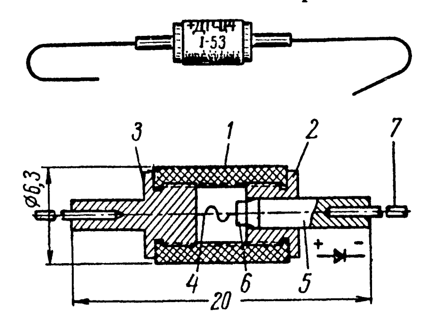
чение удельной электропроводности σ. Помимо чисто количественного влияния на величину электропроводности посторонние примеси очень легко изменяют механизм электропроводности германия. При этом существует определенная закономерность: примеси элементов III группы периодической системы Менделеева (например, бор, алюминий, галлий, индий, таллий) сообщают германию дырочную проводимость, а примеси элементов, находящихся в V группе (ванадий, сурьма, висмут и др.), сообщают германию электронную проводимость. Таким образом, с помощью незначительных количеств введенных в решетку атомов примеси можно получить германий с наперед заданными электрическими свойствами, что имеет первостепенное значение для изготовления кристаллических детекторов.

Технология изготовления германиевого детектора следующая. Сначала приготовляется слиток с электронным механизмом проводимости и возможно большим удельным сопротивлением ρ. Обычно применяется вещество со значением ρ от 5 *ом · см* и выше. Из этого слитка нарезаются маленькие кусочки, размерами примерно $1{,}5 \times 0{,}5 \times 1{,}5$ *мм*. Одна из поверхностей такого кусочка покрывается тонким слоем металла, после чего он припаивается к металлическому штырьку диода. Нанесение металлического слоя производится для того, чтобы при пайке германия к металлическому штырьку были бы до минимума сведены переходные сопротивления. После припайки наружная поверхность германия шлифуется, а затем тщательно полируется до зеркального блеска. Качество полировки контролируется под микроскопом. После полировки штырек с припаянным кристаллом тщательно промывается. Затем отполированная поверхность травится в каком-нибудь химическом реактиве в течение определенного промежутка времени. Состав реактива и время травления могут быть различными. При травлении на поверхности электронного германия образуется тонкая пленка германия с дырочным механизмом проводимости, что необходимо для всякой хорошо выпрямляющей системы.

Контактная пружина отштамповывается из вольфрамовой проволоки толщиной от 50 до 200 *мкн*. Иногда вместо вольфрамовой проволоки употребляют проволоку из фосфористой бронзы, молибдена, платины и т. д.

Отштампованная пружинка закрепляется во втором штырьке диода. Затем наружный кончик пружинки заостряется так, чтобы он приобрел коническую форму.

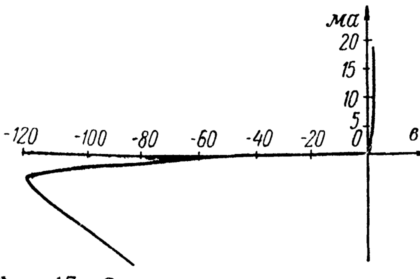
После этой операции штырек с контактной пружинкой тщательно промывается и сушится, а затем производится сборка диода. На нижний штырек надевается керамический патрон и вставляется верхний штырек. Оба штырька тем или иным способом крепятся в патрон так, чтобы острие контактной пружинки попало на кристалл. На фиг. 16 представлены внешний вид и разрез точечного германиевого диода типа ДГ-Ц4.



Фиг. 16. Внешний вид и разрез точечного германиевого диода типа ДГ-Ц4.

1 — керамический патрон; *2* и *3* — нижний и верхний штырьки детектора; *4* — контактная пружинка; *5* — кристаллодержатель; *6* — германиевая пластинка; *7* — проволочные выводы.

Изготовленный диод еще очень плохо выпрямляет, так как пропускает большие обратные токи. Для улучшения выпрямляющих свойств необходимо произвести формовку, которая заключается в том, что в пропускном направлении посылают через детектор кратковременные импульсы тока.



Фиг. 17. Статическая вольтамперная характеристика точечного германиевого диода.

Вольтамперная характеристика всех германиевых диодов имеет нелинейный характер (фиг. 17). Из рассмотрения характеристики видно, что коэффициент выпрямления германиевых детекторов чрезвычайно велик и при низких напряжениях порядка 1 *в* может достигать значений выше 10^5. Разные детекторы принято сравнивать по прямым токам при напряжении на детектор +1 *в*. Обратные токи сравнивают при обратных напряжениях, значение которых зависит от типа детектора.

В табл. 4 приводятся данные некоторых типов отечественных точечных германиевых диодов.

Выпускаемые нашей промышленностью германиевые выпрямительные диоды типа ДГ-Ц могут работать в диапазоне частот до 150 *мгц*. Они снабжены мягкими проволоч-

Таблица 4

Основные параметры точечных германиевых диодов

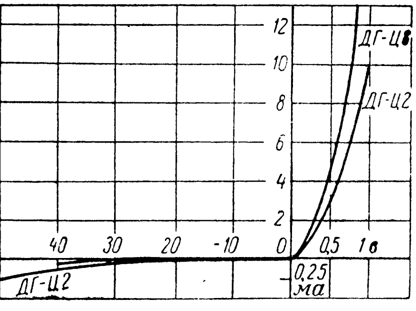
Наименование типа	Наименьший прямой ток, *ма*, при напряжении +1 *в*	Наибольший обратный ток, *ма*, при обратном рабочем напряжении				Наибольший выпрямленный ток, *ма*
		—30 *в*	—50 *в*	—75 *в*	—100 *в*	
ДГ-Ц1	2,5	—	1,0	—	—	16
ДГ-Ц2	4,0	—	0,5	—	—	16
ДГ-Ц4	2,5	—	—	0,8	—	16
ДГ Ц5	1,0	—	—	0,25	—	16
ДГ-Ц6	2,5	—	—	—	0,8	16
ДГ-Ц7	1,0	—	—	—	0,25	16
ДГ-Ц8	10,0	0,5	—	—	—	25

Примечание. Значения обратных рабочих напряжений, для которых приведены величины наибольших обратных токов, являются наибольшими для данных типов диодов.

ными выводами для припайки в схемах. Припайку следует производить осторожно на расстоянии не менее 10 *мм* от патрона детектора, так как в случае перегрева детектора может отпаяться германиевый кристаллик и детектор выйдет из строя. При этом рекомендуется применять оловянно-свинцовый припой ПОС-40.

При включении германиевого диода в схему необходимо соблюдать полярность, которая обозначена на патроне детектора.

Превышение допустимых для данного типа диода токов и напряжений может привести к его гибели.



Фиг. 18. Вольтамперные характеристики диодов ДГ-Ц2 и ДГ-Ц8.

Германиевые диоды типа ДГ-Ц имеют длительный срок службы и могут работать в температурном интервале от — 50 до + 70° С. Понижение или повышение температуры окружающей среды за пределы указанных значений приводит к снижению выпрямляющих свойств детектора, а сильный перегрев может привести даже к его гибели. Конструкция диода обеспечивает его нормальную работу при относительной влажности до 98%. Вес диода не превышает 1,7 *г*. На фиг. 18 представлены вольтамперные характеристики диодов ДГ-Ц2 и ДГ-Ц8.

По сравнению с ламповыми кристаллические диоды обладают следующими преимуществами: вольтамперная характеристика кристаллического диода при сравнительно низких напряжениях приобретает линейную форму, междуэлектродная емкость мала, отсутствует цепь накала, потребляющая энергию, габариты малы, механическая устойчивость относительно высока, срок службы велик, технология изготовления относительно проста.

Сравнительно недавно появились новые типы выпрямительных германиевых диодов, получивших название «плоскостных» диодов с *p—n*-переходами.

Принцип работы плоскостных германиевых диодов основан на создании в одном монолитном германиевом куске двух областей с различными механизмами проводимости — дырочной и электронной. Между электронной и дырочной областями одного кристалла возникает граница, получившая название *p—n*-перехода. Все плоскостные выпрямители разных типов основаны на использовании *p—n*-перехода. Обычные кристаллические диоды с вольфрамовым острием называются точечными не потому, что природа выпрямления в этих диодах принципиально отличается от природы выпрямления в плоскостных диодах, а потому, что это название характеризует основную его конструктивную особенность. Для получения *p—n*-перехода необходимо в германий с электронной проводимостью ввести примеси элементов III группы периодической системы, сообщающей ему дырочный механизм электропроводности. Однако вводимые примеси должны проникнуть не во всю толщу германия, а лишь на некоторую глубину. Если примеси войдут в весь объем, то германий приобретает дырочную проводимость. Если же примеси проникнут лишь на некоторую глубину d, меньшую чем размеры куска l, то область протяженностью d будет обладать дырочной проводимостью, а остальная часть — электронной.

В настоящее время изготовляются сравнительно мощные выпрямительные диоды различных типов. Некоторые из них выдерживают обратные напряжения более 600 *в* и пропускают прямые токи в сотни ампер при напряжении в 1 *в*.

В отличие от точечных германиевых диодов емкость плоскостных диодов больше. Поэтому эти диоды не применяют на сверхвысоких частотах; к. п. д. таких диодов достигает 98%. Срок их службы высок (не менее 10 000 час.).

Данные некоторых типов отечественных плоскостных диодов приводятся в табл. 5.

Таблица 5

Основные параметры плоскостных германиевых диодов

Наименование типа	Наибольший обратный ток, *ма*, при обратном напряжении							Наибольший выпрямленный ток, *ма*
	—50 *в*	—100 *в*	—150 *в*	—200 *в*	—300 *в*	—350 *в*	—400 *в*	
ДГ-Ц21 . . .	0,5	—	—	—	—	—	—	300
ДГ-Ц22 . . .	—	0,5	—	—	—	—	—	300
ДГ-Ц23 . . .	—	—	0,5	—	—	—	—	300
ДГ-Ц24 . . .	—	—	—	0,5	—	—	—	300
ДГ-Ц25 . . .	—	—	—	—	0,3	—	—	100
ДГ-Ц26 . . .	—	—	—	—	—	0,3	—	100
ДГ-Ц27 . . .	—	—	—	—	—	—	0,3	100

Примечания: 1. Значения обратных рабочих напряжений, для которых приведены величины наибольших обратных токов, являются наибольшими для данных типов диодов.

2. Приведенные значения наибольших выпрямленных токов достигаются для диодов типов ДГ-Ц21, ДГ-Ц22, ДГ-Ц23 и ДГ-Ц24 при напряжении +0,5 *в*, а для диодов ДГ-Ц25, ДГ-Ц26 и ДГ-Ц27 при напряжении +0,3 *в*.

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ТРИОДЫ

В 1922 г. сотрудник Нижегородской радиолаборатории О. В. Лосев открыл явление генерации и усиления радиосигналов с помощью естественных полупроводниковых кристаллов. Лосевым была разработана первая усилительная схема на этих кристаллах, известная под названием «кристадин». Однако в то время уровень знаний в области теории полупроводников, техника очистки кристаллов от примесей и методика точного определения содержания примесей были недостаточно развиты. Кроме того, серьезные успехи в конструировании приемно-усилительных радиоламп затормозили на ряд лет дальнейшие исследования возможностей более широкого использования кристаллов.

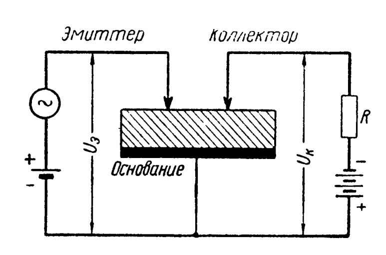
В 1948 г. в США были опубликованы сведения о первом типе кристаллического триода с точечными контактами.

Триод с точечными контактами состоит из тонкой пластинки кристалла германия или кремния (обычно с проводимостью типа *n*) и двух металлических контактных пружинок, острия которых прикасаются к верхней, хорошо обработанной поверхности пластинки на расстоянии от 50 до 250 *мкн* друг от друга. Нижняя поверхность пластинки металлизована и припаяна к металлическому основанию прибора.

Выводы кристаллического триода, которыми являются две контактные пружинки и металлическое основание (база),

включаются в схему (фиг. 19). Одна из контактных пружинок находится под небольшим положительным потенциалом и называется эмиттером, так как выполняет функции, аналогичные функциям катода электронной лампы, эмиттируя (вводя) дырки в германий типа *n*. В результате под острием эмиттера возникает так называемая площадь взаимодействия, представляющая переход типа *p*—*n*.

Значительная часть образующихся у эмиттера «дырок» привлекается ко второй пружинке, называемой коллектором, под влиянием приложенного к ней отрицательного потенциала. Таким образом, коллектор кристаллического триода аналогичен аноду электронной лампы.



Фиг. 19. Принципиальная схема включения кристаллического триода.

Металлическое основание (база) триода выполняет роль управляющего электрода, так как от его потенциала относительно эмиттера зависит количество эмиттируемых носителей тока.

В цепь эмиттера (фиг. 19) подается некоторое переменное напряжение сигнала, которое необходимо усилить. В цепь коллектора включается нагрузочное сопротивление $R_н$, с которого снимается усиленное переменное напряжение. Так как на постоянное напряжение эмиттера накладывается переменное напряжение, то синхронно с изменением потенциала эмиттера будет изменяться и ток в его цепи. Изменение величины тока в цепи эмиттера вызовет заметное изменение тока в цепи коллектора.

Отношение изменения тока коллектора к вызвавшему его изменению тока эмиттера при заданном напряжении эмиттера называется коэффициентом усиления триода по току α.

Коэффициент усиления по току точечных триодов в статическом режиме достигает обычно 2—2,5.

Рассмотрим физическую природу усиления в кристаллических триодах. Каждая точка германия с электронным механизмом проводимости, с которой непосредственно соприкасаются контактные пружинки, имеет вольтамперную характеристику, соответствующую детектору с высоким обратным напряжением. Иными словами, в каждой этой точке существует *p*—*n*-переход, обусловленный тем, что

специальной обработкой на поверхности *n*-германия создается тонкий слой *p*-германия. Когда на эмиттер в пропускном направлении подается одиночный импульс напряжения, дырки под влиянием электрического поля импульса проникнут из *p*-германия в *n*-германий. Подобное явление в специальной литературе получило название «инъекции» или «впрыскивания» носителей тока. Впрыснутые в *n*-германий дырки свободно блуждают в его объеме некоторое, весьма малое время, порядка нескольких тысячных долей секунды. За это «время жизни» неосновные носители тока (дырки) в электронном германии под действием поля коллектора успевают войти в зону *p*—*n*-перехода коллектора, что приводит к значительному повышению его проводимости. Если до подачи импульса напряжения сопротивление *p*—*n*-перехода в запирающем направлении было велико, то, после того как в зону этого перехода проникают впрыснутые эмиттером дырки, сопротивление перехода резко снижается. В результате напряжение батареи, включенной в цепь коллектора, перераспределится таким образом, что большая его часть придется на нагрузочное сопротивление, с которого оно затем и снимается.

Явления, происходящие в кристаллическом триоде, при подаче на эмиттер единичного импульса напряжения обусловливают усиление сигнала по току, напряжению и мощности. Совершенно очевидно, что природа этих процессов остается той же и в том случае, если на эмиттер будет подан не один импульс, а много импульсов, следующих друг за другом, или переменное синусоидальное напряжение. В последнем случае помимо сигналов, подлежащих усилению, на эмиттер подается еще постоянное смещение.

Одним из основных свойств кристаллического триода является его малое входное и относительно большое выходное сопротивления. Это объясняется тем, что эмиттер включен в схему в пропускном направлении, а коллектор — в запирающем направлении.

Входным сопротивлением триода является сопротивление между контактами эмиттера и управляющего электрода (базы) при разомкнутом выходе. Оно обозначается R_{11} и определяется из отношения изменения напряжения эмиттера к вызванному им изменению тока эмиттера при постоянном токе коллектора.

Выходным сопротивлением триода является сопротивление между контактами коллектора и управляющего электрода при разомкнутом входе. Подобно входному сопротив-

лению оно определяется из отношения изменения напряжения коллектора к изменению тока коллектора при постоянном токе эмиттера и обозначается R_{22}.

Для триодов с точечными контактами большей частью применяется германий с проводимостью типа *n*, так как при этом обеспечиваются большие значения коэффициента усиления по току. Однако при применении германия с проводимостью типа *p* достигаются примерно вдвое большие рабочие частоты, так как электроны в качестве носителей зарядов обладают более чем в 2 раза большей подвижностью по сравнению с дырками (3 600 *см²/всек* против 1 700 *см²/всек*). Установлено, что точечные усилительные триоды могут работать на частотах до 10 *мггц*.

Дальнейшее развитие конструкций кристаллических триодов привело к появлению в 1950 г. так называемых плоскостных триодов. Эти триоды подобно плоскостным диодам основаны на использовании монокристаллов германия, в которых тип проводимости в заданной области резко меняется. Наиболее широко применяются триоды с переходами проводимости по типу *p—n—p*. Известны также германиевые триоды типа *n—p—n*. Применение триодов обоих типов особенно удобно для симметричных, в частности двухтактных, схем, где различные комбинации триодов этих типов позволяют обойтись без трансформаторов.

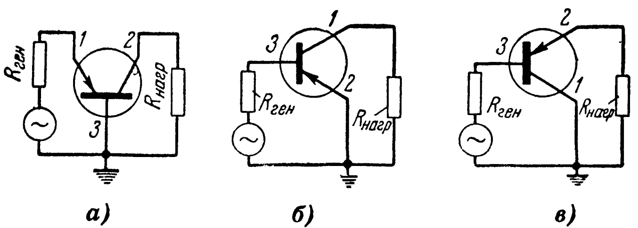
Хотя плоскостной триод имеет три области с различными типами проводимости (*n—p—n* или *p—n—p*), последние связаны единой кристаллической решеткой. К каждой из этих областей присоединяются контакты с сравнительно большой площадью. Промежуточные слои с проводимостью типа *p* (для триода *n—p—n*) или *n* (для триода *p—n—p*) выполняют роль управляющего электрода (базы), а остальные — соответственно эмиттера и коллектора.

Плоскостные кристаллические триоды обладают рядом существенных преимуществ, хотя по принципу действия они мало отличаются от точечных кристаллических триодов. Благодаря отсутствию точечных контактов плоскостные триоды обладают высокой механической прочностью, большим сроком службы (порядка нескольких десятков тысяч часов) и значительно меньшими собственными шумами.

Кроме того, осуществление больших контактных поверхностей позволило получить и значительно большие выходные мощности. Уже в настоящее время известны образцы кристаллических триодов с выходной мощностью до 100 *вт*.

Кристаллические триоды могут применяться в трех схемах включения: с заземленной базой, с заземленным эмиттером и с заземленным коллектором (фиг. 20).

Точечные триоды могут применяться только в схеме с заземленной базой, так как в других схемах они работают неустойчиво, в то время как плоскостные триоды могут применяться в любой из приведенных схем.



Фиг. 20. Основные схемы включения кристаллических триодов.

а — с заземленной базой: *б* — с заземленным эмиттером, *в* — с заземленным коллектором.

Данные некоторых отечественных точечных и плоскостных триодов приведены в табл. 6, где приняты следующие обозначения:

$I_э$ — ток эмиттера; $I_к$ — ток коллектора; $U_к$ — напряжение коллектора: R_{11} — входное сопротивление триода (определение дано выше); R_{12} — сопротивление обратной связи при разомкнутом входе (сопротивление базы), определяемое из отношения изменения напряжения эмиттера к вызвавшему его изменению тока коллектора при постоянном токе эмиттера; R_{22} — выходное сопротивление триода (определение дано выше); α — коэффициент усиления по току (определение дано выше); $\alpha_{пред}$ — коэффициент усиления по току на наибольшей рабочей частоте; $K_м$ — коэффициент усиления по мощности, определяемой как отношение колебательной мощности, выделяемой в нагрузке триода $\left(\frac{U^2_{вых}}{R_н}\right)$, к полезной мощности источника входного сигнала $\left(\frac{U^2_г}{4R_г}\right)$: здесь $U_{вых}$ — переменная составляющая выходного напряжения; $R_н$ — сопротивление нагрузки; $U_г$ — э. д. с. источника входного сигнала; $R_г$ — внутреннее сопротивление источника входного сигнала; $K_н$ — коэф-

Основные параметры отечест

1. Точечные трио

Подтипы	Назначение	Режимы измерения		Пара	
		$I_э$, *ма*	$U_к$, *в*	R_{11}, *ом* (макс.)	R_{12}, *ом* (макс.)
С1А	Усиление сигналов до 500 *кгц*	0,3	—20	750	200
С1Б	Усиление сигналов до 500 *кгц* . . .	0,3	—20	750	200
С1В	Усиление сигналов до 1 500 *кгц*	0,3	—20	750	200
С1Г	Усиление сигналов до 1 500 *кгц*	0,3	—20	750	200
С1Д	Усиление сигналов до 5 000 *кгц*	0,3	—20	750	200
С2А	Генерирование колебаний до 500 *кгц*	0,3	—10	1 500	1 000
С2Б	Генерирование колебаний до 1 500 *кгц*	0,3	—10	1 500	700
С2В	Генерирование колебаний до 5 000 *кгц*	0,3	—10	1 500	1 000

[1] Параметры измеряются в схеме с заземленной базой в режиме усиления
* При сопротивлении генератора 500 *ом* и сопротивлении нагрузки 10 *ком*.

2. Плоскостные
(*р*—

Подтипы	Назначение	Режимы измерений			Пара	
		$I_э{}^1$, *ма*	$I_к{}^1$, *ма*	$U_к{}^1$, *в*	$R_э$, *ом*	$R_к$, *мгом*
П1А	Усиление сигналов до 100 *кгц*	1,0	—	—10	30	мин. 0,3
П1Б	Усиление сигналов до 100 *кгц*	1,0	—	—10	30	0,5—1,2
П1В	Усиление сигналов до 100 *кгц*	1,0	—	—10	30	мин. 1,0
П1Г	Усиление сигналов до 100 *кгц*	1,0	—	—10	30	мин. 0,5
П1Д	Усиление сигналов до 100 *кгц*	1,0	—	—10	30	мин. 0,5
П1Е	Усиление сигналов до 465 *кгц*	1,0	—	—10	30	мин. 0,3
П2	Усиление сигналов звуковой частоты	—	—5	—50	—	—

[1] Направление токов от эмиттера и коллектора к базе приняты за положительное. Напряжения измеряются по отношению к базе.
[2] Параметры измеряются при температуре +20±5° С.
[3] α измеряется в схеме с заземленной базой на частоте 1 000 *гц* при короткозамкнутом выходе.
[4] $K_м$ и $N_ш$ измеряются в схеме с заземленным эмиттером в режиме усиления класса А на частоте 1 000 *гц* при внутреннем сопротивлении генератора 600 *ом* и сопротивлении нагрузки 30 *ком*.
[5] $P_\sim$ и K_f измеряются в схеме с заземленной базой на частоте 400 *гц* при внутреннем сопротивлении генератора 100 *ом* и сопротивлении нагрузки 10 *ком*.

Указания по эксплуатации. Предельно допустимая температура окружающей среды +50° С.

При включении триода базовый контакт должен присоединяться первым.

Триоды не должны размещаться вблизи нагревающихся элементов схемы. Желательно сделать хороший теплоотвод от корпуса триода.

Пайка и изгиб выводов допускаются на расстоянии не менее 10 *мм* от корпуса триода. Для пайки употреблять припой с температурой плавления не выше 150° С.

Таблица 6

венных германиевых триодов

ды типов С1 и С2

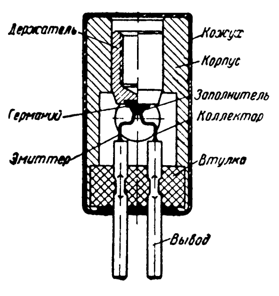
метры [1]					Предельно допустимые величины			
R_{22}, *ком* (мин.)	α (мин.)	$\alpha_{пред}$ (мин.)	$K_м$*, *дб*	$K_н$	$I_э$, *ма*	$I_к$, *ма*	$U_к$, *в*	$P_к$, *мвт*
7	1,2	1,0	15—19	—	10	10	—40	100
7	1,5	1,2	18—22	—	10	6	—40	50
7	1,5	1,2	15—19	—	10	10	—40	100
7	1,5	1,2	18—22	—	10	6	—40	50
7	1,5	1,2	15—22	30	10	6	—40	50
7	1,5	1,2	—	—	10	10	—30	100
7	1,6	1,5	—	—	10	6	—20	50
7	1,6	1,5	—	—	10	6	—20	50

класса А на частоте не более 20 *кгц* при температуре +20±5° С.

триоды типов П1 и П2

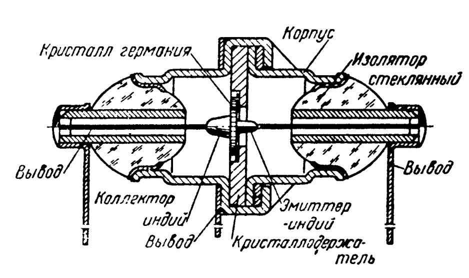
n—p)

метры [2]								Предельно допустимые величины			
$R_{базы}$, *ом* (макс.)	α [3]	$\alpha_{пред}$ (мин.)	$K_м$ [4], *дб* (мин.)	$N_ш$ [4] *дб* (макс.)	$P_\sim$ [5], *мвт* (мин.)	K_f [5], % (макс.)	$C_к$, *пф* (макс.)	$I_э$ [1], *ма*	$I_к$ [1], *в*	$U_к$ [1], *в*	$P_к$, *мвт* (макс.)
—	мин. 0,9	0,7	30	—	—	—	—	5	5	—20	50
400	0,93—0,97	0,7	33	35	—	—	—	5	5	—20	50
400	0,93—0,97	0,7	37	35	—	—	—	5	5	—20	50
600	мин. 0,96	0,7	37	—	—	—	—	5	5	—20	50
600	мин. 0,94	0,7	33	18	—	—	—	5	5	—20	50
1 000	0,94—1,0	0,7	30	35	—	—	60	5	5	—20	50
—	мин. 0,85	—	17	—	100	15	—	10	10	—100	250





Разрез точечного триода.



Разрез плоскостного триода.

фициент усиления по напряжению; $P_к$ — наибольшая мощность, рассеиваемая коллектором; $R_э$ — сопротивление эмиттера, определяемое из отношения изменения напряжения между базой и эмиттером к вызвавшему его изменению тока коллектора при постоянном токе базы; $R_к$ — сопротивление коллектора, определяемое из отношения изменения напряжения между базой и коллектором к вызвавшему его изменению тока коллектора при постоянном токе базы; $N_ш$ — фактор шумов; $P_{\sim}$ — отдаваемая мощность; K_f — коэффициент нелинейных искажений; $C_к$ — емкость коллектора, т. е. емкость запорного слоя коллектора.

Серьезными недостатками современных кристаллических триодов являются большой разброс параметров, сравнительно низкие рабочие частоты, высокий уровень собственных шумов и неустойчивая работа при воздействии окружающих температур выше 70° С.

Однако серьезные принципиальные преимущества кристаллических триодов (высокая экономичность и долговечность, малые вес и габариты и высокая механическая прочность) стимулировали во всех странах развертывание работ по улучшению их параметров. В последние годы в этой области достигнуты новые серьезные успехи.

Так, например, в результате ряда технологических усовершенствований и получения более однородного материала некоторые типы германиевых триодов стали устойчиво работать при окружающей температуре до 85° С. В 1953 г. появился плоскостной кристаллический тетрод с предельной рабочей частотой до 20 *мггц*.

В 1954 г. в периодической технической литературе появились сведения о новом типе германиевого триода — с так называемыми поверхностными барьерами. В этом триоде с целью повышения рабочей частоты на противоположных сторонах пластины германия электролитическим методом протравливаются два углубления — лунки так, чтобы остался тонкий слой германия толщиной 0,005 *мм*. Затем на дно лунок тем же методом наносится тонкий слой индия, чем обеспечивается получение *p*—*n*-перехода с каждой стороны. Новые кристаллические триоды могут работать при рабочих частотах до 60—100 *мггц* и в 10—20 раз экономичнее триодов с точечными контактами.

Установлено также, что применение вместо германия кремния позволяет не только повысить рабочие частоты,

но и резко увеличить температуроустойчивость кристаллических триодов.

В настоящее время известны образцы кремниевых кристаллических триодов, которые работают при температуре до 150—175° С. В связи с этим в ряде стран ведутся разработки способов получения кремния с требуемой степенью чистоты в больших количествах, а также разработки конструкций кремниевых триодов и диодов.

В 1954 г. были опубликованы также сведения о кристаллических плоскостных триодах типа *p—n—i—p* и *n—p—i—n*. В таком триоде между слоем основания (базы) с проводимостью типа *n* и слоем коллектора с проводимостью типа *p* помещается слой хорошо очищенного (почти беспримесного) германия, обладающего собственной проводимостью. Благодаря этому уменьшается действующая емкость база-коллектор и увеличивается подвижность носителей тока через эту область, что позволило повысить рабочую частоту примерно в 10 раз. Изготовленные образцы триодов с толщиной промежуточного слоя (обозначаемого буквой *i*) 50 *мкн* работают на частоте 95 *мггц*. На основе теоретических расчетов предполагается, что триоды этого типа будут генерировать на частотах до 3 000 *мггц* и иметь усиление до 10 *дб* на частоте 1 000 *мггц*.

ПРИМЕНЕНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

Полупроводниковые выпрямители известны сравнительно давно и завоевали всеобщее признание благодаря таким преимуществам, как высокое значение к. п. д. (75%) при сравнительно низких напряжениях, конструктивная простота, надежность, отсутствие вращающихся или трущихся частей, высокая экономичность и т. д.

Широкое распространение получили селеновые выпрямители, которые используются для питания установок связи, систем автоблокировки на транспорте, для зарядки аккумуляторов, для питания электролитических ванн с расходом тока в сотни и тысячи ампер и т. п. Полупроводниковые диоды (кремниевые и германиевые) до настоящего времени остаются основными типами детекторных и смесительных приборов в сантиметровом диапазоне волн. Полупроводниковые точечные и плоскостные выпрямительные диоды успешно применяются в качестве дискриминаторов и выпрямителей токов высокой и низкой частоты.

Применение германиевых диодов и техники печатных схем позволило резко сократить габариты аппаратуры. Использование кристаллических триодов дало возможность еще больше упростить эту аппаратуру и серьезно повысить надежность ее работы. В настоящее время германиевые триоды находят все более широкое применение в портативных радиоприемниках «карманного» типа, в усилительных аппаратах для тугоухих и др.

Как известно, для питания ламповых автомобильных радиоприемников от аккумуляторов применяются вибрационные преобразователи постоянного тока в переменный и выпрямители. Срок службы вибропреобразователей невысок (сотни часов), а стоимость велика. Способность полупроводниковых триодов работать при низких напряжениях и успехи в создании выходных усилительных триодов с мощностями в несколько ватт позволили сконструировать первые автомобильные радиоприемники с непосредственным питанием от аккумулятора.

Применение кристаллических триодов в проводной телефонии открывает новые перспективы перед этим видом связи, так как позволит серьезно улучшить его качественные показатели. Применение электронных ламп здесь не всегда целесообразно ввиду их ограниченного срока службы и необходимости большого количества различных источников тока.

В частности, весьма перспективно применение кристаллических триодов в кабельных линиях связи, особенно подводных, где велика потребность в необслуживаемых усилителях.

Кристаллические усилительные и генераторные приборы находятся в сущности лишь в начальной стадии своего развития. Однако уже теперь разработаны и экспериментально проверены многочисленные схемы усилителей низкой частоты, усилителей постоянного тока, усилителей промежуточной частоты, видеоусилителей, генераторов синусоидальных колебаний, блокинг-генераторов, мультивибраторов и др. Уже выпущены не только промышленные типы вещательных радиоприемников, но появились первые экспериментальные образцы телевизоров.

Нет сомнения, что дальнейшее развитие техники полупроводниковых приборов произведет революцию в конструировании и технологии производства электронной аппаратуры и будет способствовать ее все более широкому внедрению во все области народного хозяйства.

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

ФОТОСОПРОТИВЛЕНИЯ

СЕЛЕНОВЫЕ ФОТОСОПРОТИВЛЕНИЯ

Внутренний фотоэффект был открыт в 1873 г., а через два года было изготовлено первое селеновое фотосопротивление.

Иногда полупроводниковые фотосопротивления не вполне удачно называют фотоэлементами. В полупроводниковом сопротивлении поглощенное излучение вызывает уменьшение сопротивления вещества и не создает ни фотоэлектрического тока, ни э. д. с., как в фотоэлементе с запирающим слоем.

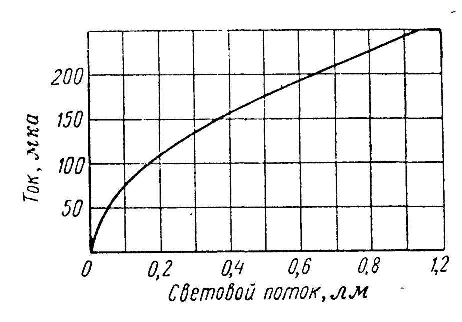
Между фотоэлементом с внешним фотоэффектом и фотосопротивлением также существует принципиальное различие. В вакуумном или газонаполненном фотоэлементе ток может идти лишь в одном направлении. Фотосопротивление лишено этой особенности. Оно одинаково проводит электричество как в одном, так и в другом направлении. При внутреннем фотоэффекте, как было уже показано в предыдущей главе, энергия поглощенного света расходуется не на вырывание электронов из вещества, а на освобождение некоторого их числа внутри самой массы вещества, на перевод их в зоны проводимости. Благодаря появлению фотоэлектронов заметно уменьшается электрическое сопротивление полупроводника, из которого сделано фотосопротивление. Здесь лучистая энергия не проявляет себя в явном виде, а находится в скрытом состоянии, как бы консервируется в материале фотосопротивления. Таким образом, фотосопротивление — это полупроводниковый прибор, изменяющий свое электрическое сопротивление под действием света.

Из предыдущего рассмотрения физической сущности внутреннего фотоэффекта становится ясным принципиальное устройство фотосопротивления. Фотосопротивление представляет собой пластинку (в большинстве случаев тонкий слой полупроводника), на краевые области которого накладываются металлические электроды, обеспечивающие надежный электрический контакт. Такое фотосопротивление включается в цепь последовательно с источником питания.

Когда фотосопротивление затемнено, во всей цепи, а следовательно, и в самом фотосопротивлении, течет электрический ток, величина которого определяется омическим со-

противлением фотосопротивления и приложенной к нему разностью потенциалов. Такой ток называют темновым. При освещении фотосопротивления ток возрастает и возрастание это тем больше, чем больше световой поток. Разность между световым и темновым токами и дает нам значение фототока.

Фотосопротивления в зависимости от своего назначения изготовляются из разных полупроводниковых материалов. Чувствительность фотосопротивлений значительно выше чувствительности вакуумных фотоэлементов с внешним фотоэффектом. Это значит, что при одинаковой освещенности фотосопротивление обеспечивает в несколько раз большее возрастание тока в цепи по сравнению с фотоэлементом с внешним фотоэффектом. Существенным недостатком большинства фотосопротивлений является значительная инерционность, в то время как вакуумный фотоэлемент с внешним фотоэффектом является практически безинерционным прибором.



Фиг. 21. Световая характеристика фотосопротивления.

Вторым существенным недостатком фотосопротивлений является нелинейная зависимость возрастания фототока от возрастания интенсивности светового потока. На фиг. 21 приведена зависимость фототока в микроамперах (*мка*) от светового потока в люменах (*лм*).

Хотя эти два недостатка весьма существенны, они не закрывают фотосопротивлениям доступа во многие области техники. Кроме того, в настоящее время изыскиваются новые полупроводниковые материалы, которые были бы в значительной степени лишены этих недостатков, конструируются новые типы фотосопротивлений с улучшенными параметрами. В самое последнее время физикам удалось разрешить многие трудности и получить фотосопротивления, во многом свободные от недостатков, присущих их предшественникам.

В зависимости от вещества, из которого сделаны фотосопротивления, последние обладают разными спектральными характеристиками и различной интегральной чувствительностью. Под интегральной чувствитель-

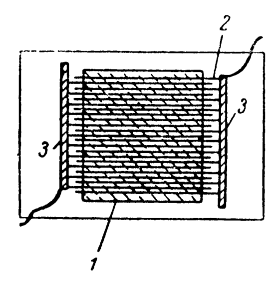
ностью фотоэлемента или фотосопротивления понимают величину фототока, который течет в цепи при падении на фотоэлемент единицы потока лучистой энергии, состоящего из волн различной длины и соответствующего по своему спектральному составу излучению лампы с вольфрамовой нитью, которая накалена до температуры 2 840° К. Эта единица потока видимого света называется люмен. Таким образом, интегральная чувствительность фотоэлемента в видимой части спектра измеряется в микроамперах на люмен (*мка/лм*). Спектральная чувствительность характеризует величину фототока, возникающего от действия единицы потока лучистой энергии определенной длины волны. Таким образом, если интегральная чувствительность фотоэлемента может определяться одним числом — величиной фототока, отнесенного к единице энергии падающего излучения, то спектральная чувствительность каждого фотоэлемента обычно изображается в виде графика. На вертикальной оси графика откладываются значения чувствительности или фототока, а на горизонтальной оси — значения длины волн в каких-либо единицах, например в ангстремах.

Первое по времени фотосопротивление было изготовлено из селена, сыгравшего в истории науки и техники крупнейшую роль. Технология изготовления селеновых фотосопротивлений разрабатывалась и совершенствовалась годами.

Одна из современных схем изготовления фотосопротивлений состоит в следующем. На изолирующую пластинку, например стеклянную, наносится тонкий слой селена. Обычно нанесение этого слоя осуществляется методом испарения в вакууме в специальной установке под стеклянным колпаком или в стеклянной колбе, в которой при помощи насосов создается вакуум порядка 10^{-5} *мм* рт. ст. В пространстве под колпаком находятся два металлических ввода, к которым прикрепляется металлическая лодочка, загруженная селеном. Над лодочкой укрепляются стеклянные пластинки. Затем на вводы подогревателя подается напряжение и идущий через лодочку ток нагревает ее до температуры, при которой селен начинает хорошо испаряться и конденсируется на стеклянных пластинках, подвешенных над лодочкой. Регулируя время испарения, можно наносить слой любой, наперед заданной толщины. Для фотосопротивлений наносится слой толщиной порядка 20—30 *мкн*. До испарения селена на стеклянную пластинку наносятся несколько электродов в виде полосок, как это показано на

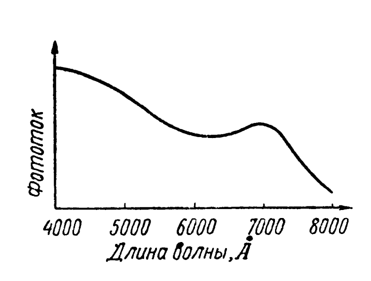
фиг. 22. Одна часть электродов присоединяется к правому выводу, другая — к левому.

Так как селен на воздухе с течением времени окисляется, что отрицательно сказывается на фотоэлектрических свойствах слоя, то его снаружи покрывают защитной пленкой прозрачного лака.



Фиг. 22. Конструкция селенового фотосопротивления.

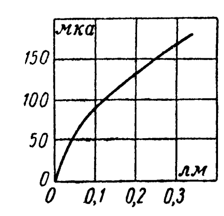
1 — селен; 2 — штырьки на стеклянной подложке; 3 — электроды.



Фиг. 23. Спектральная характеристика селенового фотосопротивления.

Селеновые фотосопротивления имеют спектральную чувствительность, представленную на фиг. 23.

На фиг. 24 изображена световая характеристика селенового фотосопротивления — зависимость фототока от светового потока. Эта характеристика имеет нелинейный ход и снята при некотором вполне определенном напряжении.

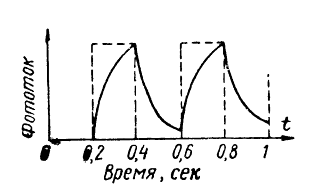


Фиг. 24. Световая характеристика селенового фотосопротивления.

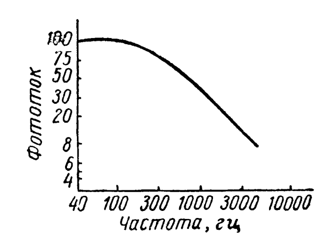
Темновые сопротивления селеновых фотосопротивлений различны и находятся в пределах от 10^4 до 10^8 *ом*. Их интегральная чувствительность в зависимости от исходных условий также бывает различной и лежит в пределах от 100 до 3 000 *мка/лм*.

Селеновые фотосопротивления обладают значительной инерционностью, поэтому, например, применение их в звуковом кино исключается. На фиг. 25 изображена кривая (сплошная), наглядно иллюстрирующая инерционность селенового фотосопротивления, снятая, когда на фотосопротивление были поданы кратковременные световые импульсы прямоугольной формы (пунктирная кривая) продолжительностью в 0,2 сек. с перерывами в 0,2 сек. Из частотной ха-

рактеристики фотосопротивления, показанной на фиг. 26 видно, что, начиная с частоты около 200 *гц*, величина тока резко снижается.



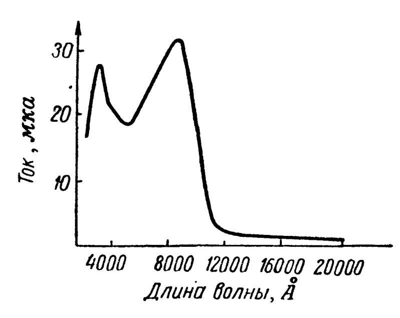
Фиг. 25. Инерционность селенового фотосопротивления.



Фиг. 26. Частотная характеристика селенового фотосопротивления.

ТАЛЛОФИДЫ

В свое время большой практический интерес вызвали серноталлиевые фотосопротивления. Как видно из фиг. 27, максимум чувствительности серноталлиевых фотосопротивлений лежит в инфракрасной области спектра (около 8 000 Å). Таким образом, таллофиды являются хорошими приемниками длинноволнового светового излучения. Следует заметить, что еще и в настоящее время таллофиды продолжают применяться в некоторых случаях.



Фиг. 27. Спектральная характеристика таллофида.

Однако по мере появления новых типов фотосопротивлений значение таллофидов падает.

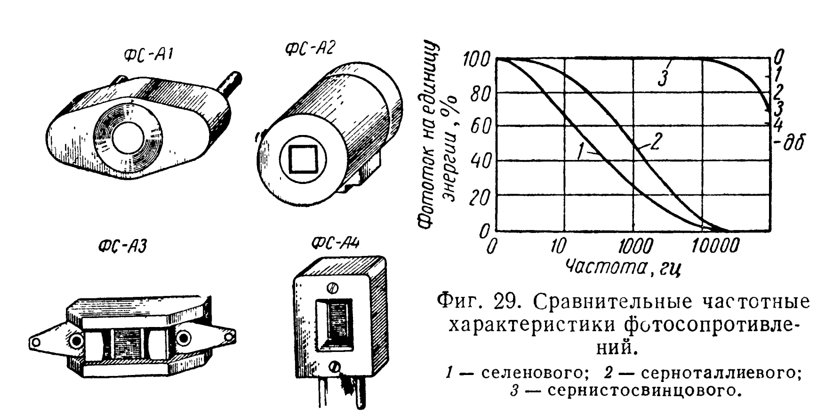
ФОТОСОПРОТИВЛЕНИЯ ИЗ СЕРНИСТОГО СВИНЦА

Бесспорно крупным шагом вперед следует считать изобретение фотосопротивлений из сернистого свинца (PbS), выпускаемых нашей промышленностью под марками ФС-А1, ФС-А2, ФС-А3 и ФС-А3 и ФС-А4. Заслуга создания этих типов фотосопротивлений в Советском Союзе принадлежит Б. Т. Коломийцу.

Технология изготовления сернистосвинцовых фотосопротивлений может быть различной. В частности, можно по-

лучать тонкие слои из PbS путем испарения его в вакууме на какую-нибудь изолирующую подложку — стекло, слюду, керамику. На полупроводниковый слой затем накладываются электроды и вся эта система помещается в патрон. На фиг. 28 изображен внешний вид фотосопротивлений ФС-А1, ФС-А2, ФС-А3 и ФС-А4.

Главное и крупное достоинство фотосопротивлений из сернистого свинца заключается в том, что они по сравнению



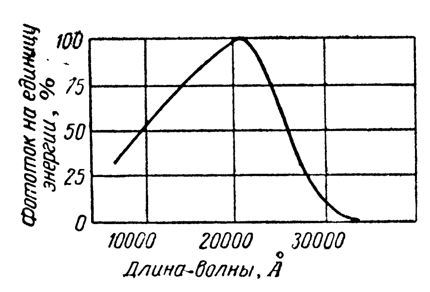
Фиг. 29. Сравнительные частотные характеристики фотосопротивлений.
1 — селенового; *2* — серноталлиевого; *3* — сернистосвинцового.

Фиг. 28. Внешний вид сернистосвинцовых фотосопротивлений.

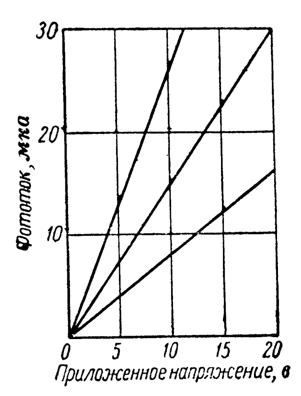
с селеновыми фотосопротивлениями и таллофидами обладают значительно меньшей инерционностью. На фиг. 29 представлены частотные характеристики фотосопротивлений, изготовленных из селена *1*, сернистого таллия *2* и сернистого свинца *3*. Как видно из фиг. 29, частотная характеристика сернистосвинцовых фотосопротивлений значительно лучше соответствующих характеристик селенового фотосопротивления и таллофида.

Интегральная чувствительность фотосопротивлений может повышаться за счет увеличения рабочего напряжения. Поэтому чувствительность того или иного фотосопротивления необходимо относить к определенному рабочему напряжению. Если значения чувствительности приводятся без указания величины приложенного напряжения, следует подразумевать обычное рабочее напряжение, рекомендуемое для данного типа фотосопротивления. С понижением температуры чувствительность сернистосвинцовых фотосопротивлений, как впрочем и всех остальных, заметно увеличивается.

Другим достоинством фотосопротивлений из PbS является их сравнительно широкая спектральная чувствительность. Как видно из фиг. 30, максимум чувствительности их находится в инфракрасной области около 21 000 Å. Внутреннее сопротивление этих приборов может быть весьма различным (от десятков тысяч *ом* до нескольких мегомов), а характер спектральной чувствительности, при равных толщинах полупроводникового слоя один и тот же. При уменьшении толщины полупроводнико-



Фиг. 30. Спектральная характеристика сернистосвинцового фотосопротивления.



Фиг. 31. Вольтамперные характеристики сернистосвинцового фотосопротивления при разных освещенностях.

вого слоя максимум чувствительности несколько смещается в сторону коротких волн и, наоборот, с увеличением толщины слоя этот максимум смещается в сторону длинных волн.

Фототок в сернистосвинцовых фотосопротивлениях линейно зависит от приложенной разности потенциалов. На фиг. 31 приведены три вольтамперные характеристики, снятые при различных освещенностях поверхности фотосопротивления.

В серносвинцовых фотосопротивлениях, к сожалению, не существует линейной зависимости между фототоком и интенсивностью освещения. Эта зависимость имеет более сложный характер.

Фотосопротивления типа ФС-А не рекомендуется применять в условиях повышенной влажности. Кроме того, нужно иметь в виду, что повышенное напряжение, приложенное к фотосопротивлению, может привести к выходу его из строя. Поэтому для каждого экземпляра ФС-А нужно знать величину рекомендованного рабочего напряжения,

которое указывается на паспорте, прилагаемом к прибору. В качестве примера можно указать, что к ФС-А1 прикладывается напряжение, при котором темновой ток становится равным 100 *мка* (около 15 *в*). Фотосопротивления типа ФС-А не боятся «засветки», т. е. действия мощных и ярких световых потоков, приводящих в других случаях к необратимой потере чувствительности. В условиях нормальной эксплуатации фотосопротивления из сернистого свинца имеют практически неограниченный срок службы.

Высокая чувствительность, малые значения рабочих напряжений, относительно малая инерционность, простота и надежность эксплуатации сернистосвинцовых фотосопротивлений дают основание полагать, что области их практического использования будут увеличиваться.

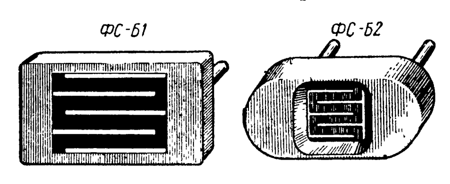
ФОТОСОПРОТИВЛЕНИЯ ИЗ СЕРНИСТОГО ВИСМУТА

Высокие фотоэлектрические свойства естественных кристаллов, известных под названием висмутового блеска или висмутинита, привели к мысли о возможности получения подобных свойств у синтезированного вещества такого же состава. И действительно, удалось не только всесторонне исследовать физические свойства Bi_2S_3, но и сконструировать первые типы фотосопротивлений, принятых промышленностью для массового выпуска.

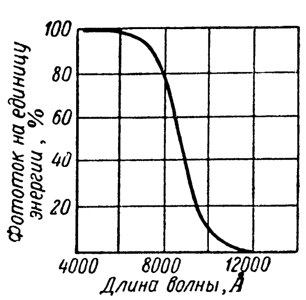
В принципе технология изготовления фотосопротивлений этого типа мало отличается от технологии, принятой при изготовлении фотосопротивлений из других материалов. На стеклянную пластинку наносится тонкий слой сернистого висмута. Поверх полупроводникового слоя наносятся металлические электроды в виде тоненьких полосок. Половина всех полосок соединяется с одним боковым электродом, а вторая — с другим. Стеклянная пластинка с нанесенными на нее полупроводниковым слоем и электродами монтируется в эбонитовую или пластмассовую оправку, имеющую открытое окно соответствующего размера. Во избежание механических повреждений фоточувствительного слоя и воздействий окружающей среды полупроводниковая поверхность покрывается прозрачным лаком. В тыловую часть оправки вмонтированы два штырьковых электрода, расстояние между которыми подобрано таким образом, чтобы оправка могла включаться в нормальную ламповую панель. На фиг. 32 показан внешний вид фотосопротивлений из сернистого висмута типа ФС-Б1 и ФС-Б2, разработанных Б. Т. Коломийцем.

Омические сопротивления ФС-Б1 и ФС-Б2 обычно лежат в некоторых пределах, например между 0,3 и 50 *мгом* для ФС-Б2.

В отличие от фотосопротивлений из сернистого свинца спектральная чувствительность сернистовисмутовых фотосопротивлений имеет, как это показано на фиг. 33, максимум в видимой части спектра и не меняется в зависимости от изменения температуры в довольно широких пределах. Величина фототока у ФС-Б1 и ФС-Б2 линейно зависит от напряжения.



Фиг. 32. Внешний вид фотосопротивлений ФС-Б1 и ФС-Б2.



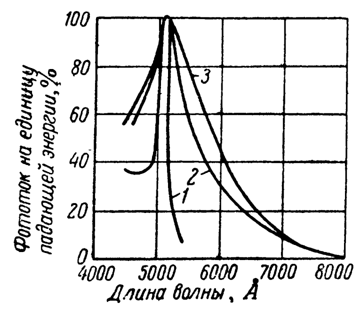
Фиг. 33. Спектральная характеристика фотосопротивления из сернистого висмута.

Сернистовисмутовые фотосопротивления обладают довольно большой инерционностью. Правда, частотные характеристики ФС-Б1 и ФС-Б2 значительно лучше, чем у селеновых фотосопротивлений или таллофидов, тем не менее они таковы, что ограничивают применение этих фотосопротивлений в устройствах, работающих на высоких частотах. С понижением температуры инерционность ФС-Б1 и ФС-Б2 значительно возрастает. Интегральная чувствительность ФС-Б1 и ФС-Б2 достаточно высока. В отдельных экземплярах она достигает величины 80 *ма/лм* при освещенности 100 люкс и приложенной к фотосопротивлению разности потенциалов 80 *в*.

ФОТОСОПРОТИВЛЕНИЯ ИЗ СЕРНИСТОГО КАДМИЯ

Высокие фотоэлектрические свойства сернистого кадмия (CdS) позволили получить из него прекрасные фотосопротивления. Спектральная чувствительность фотосопротивлений из сернистого кадмия имеет максимум в видимой области спектра около 5 300 Å. На фиг. 34 представлены три спектральные характеристики для трех различных типов фотосопротивлений из CdS. Первое фотосопротивление

сделано из монокристалла, второе — из поликристаллического вещества, а третье — из спрессованного порошка CdS. Как видно из фигуры, наилучшая характеристика относится к последнему случаю. Из фиг. 34 видно, что спектральная характеристика для фотосопротивления из поликристаллического вещества по существу мало отличается от характеристики фотосопротивления из порошка. В отличие от всех остальных фотосопротивлений отношение сопротивлений затемненного полупроводникового слоя к освещенному достигает для CdS совершенно поразительного числа в 150 000, что придает CdS большую ценность. В Советском Союзе выпускаются фотосопротивления из сернистого кадмия под марками ФС-К1, ФС-К2, ФС-К0 и ФСК-М1. Максимум чувствительности ФС-К1 лежит в области 5 200 Å, а ФС-К2 — 6 000 Å.



Фиг. 34. Спектральные характеристики фотосопротивлений из CdS.

1 — монокристалл; *2* — поликристаллическое вещество; *3* — порошок из монокристалла.

Кроме рассмотренных типов фотосопротивлений, существуют фотосопротивления из селенистого кадмия (CdSe), селенистого свинца (PbSe), германия (Ge), кремния (Si) и других полупроводников.

Так, например, для астрофизических исследований применяются фотосопротивления, обладающие максимумом чувствительности в инфракрасной области спектра. Для этой цели с успехом могут быть использованы сerносвинцовые и селеносвинцовые фотосопротивления в охлажденном состоянии.

В табл. 7 приводятся параметры наиболее распространенных промышленных типов фотосопротивлений.

Удельная чувствительность по току выражается числом микроампер, отнесенным к одному люмену и одному вольту приложенного напряжения. Величина максимальной чувствительности определяется перемножением удельной чувствительности на предельно допустимое рабочее напряжение, которое различно для разных типов фотосопротивления.

Таблица 7

Основные параметры фотосопротивлений ФС-А1, ФС-Б2, ФС-К1 и ФС-К2

Данные фотосопротивлений	ФС-А1	ФС-Б2	ФС-К1	ФС-К2
Рабочая площадь, *см²*	0,21	1,21	0,25	0,25
Темновое сопротивление, *ом*	10^4—10^5	10^5—10^7	10^7	10^6
Удельная чувствительность, *мка/лм·в*	5 000	1 000	3 000	2 500
Предельное рабочее напряжение, *в*	15	50	400	300
Среднее относительное изменение сопротивления, % . .	17	83	99,28	97,14
Средняя кратность изменения сопротивления	1,2	5	140	35
Средний температурный коэффициент фототока в интервале температур 0 — 40° С, %/° С	1,5	1,0	1,4	0,12

Из табл. 7 видно, что сопротивления ФС-К1 и ФС-К2 обладают весьма высоким значением предельного рабочего напряжения и высокой удельной чувствительностью.

Данные, приведенные для ФС-А1 и ФС-Б2, получены для освещенности 200 люкс, а для ФС-К1 и ФС-К2 — при 100 люкс.

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

ФОТОЭЛЕМЕНТЫ С ЗАПОРНЫМ СЛОЕМ

СЕЛЕНОВЫЕ ФОТОЭЛЕМЕНТЫ

В 1876 г. Адамсом и Дэйем было открыто совершенно новое явление, не получившее в то время физического объяснения. Сущность этого явления заключалась в том, что при освещении палочки селена на ней возникала самостоятельная электродвижущая сила. Как это иногда бывает с новыми открытиями, об этом явлении скоро забыли и лишь в 30-х годах нашего столетия оно было открыто вновь, получило название фотоэффекта запорного слоя и нашло сразу же практический выход, став основой фотоэлементов с запорным слоем.

Первый фотоэлемент подобного типа был изготовлен из закиси меди и в течение ряда лет имел некоторое примене-

ние. Почти одновременно с ним был изобретен селеновый фотоэлемент, который получил значительно более широкое распространение и не потерял еще своего значения в наши дни.

Технология изготовления селенового фотоэлемента претерпела с момента его изобретения ряд изменений.

В принципе всякий фотоэлемент с запорным слоем, или, как его иначе называют, вентильный фотоэлемент, представляет собой систему, состоящую из металлической подложки, тонкого слоя полупроводника и верхнего металлического полупрозрачного электрода. В процессе изготовления вентильного фотоэлемента в районе подложки, либо в районе верхнего полупрозрачного металлического электрода должен обязательно образоваться запирающий слой.

Подложка будущего фотоэлемента выполняет две функции. С одной стороны, она является держателем хрупкого селенового слоя, предохраняющим его от механических повреждений, а с другой стороны, при ее посредстве осуществляется надежный электрический контакт. В связи с этим подложка должна быть массивной и делается из стального листа толщиной 1—2 *мм*. Сторона подложки в форме диска, на которую наносится селеновый слой, шлифуется или обрабатывается пескоструйным аппаратом для того, чтобы селеновый слой хорошо прилегал бы к стальному диску. Отшлифованная подложка тщательно промывается, высушивается и подвешивается внутри колокола вакуумной установки отшлифованной поверхностью вниз.

Селеновый слой наносится методом испарения в вакууме. Для этой цели под колоколом вакуумной установки устанавливается электронагревательная печь, выполненная из нихромовой спирали. Внутрь печи помещается небольшая стеклянная чашечка из молибденового стекла, куда загружается некоторое количество плавленого селена. Железный диск находится на расстоянии 70—100 *мм* от чашечки с селеном, по возможности посередине для равномерного нанесения слоя.

После того как под колоколом вакуумной установки устанавливается вакуум порядка 10^{-4} *мм* рт. ст., через обмотку нагревательной печи пропускается ток с таким расчетом, чтобы находящийся в стеклянной чашечке селен быстро расплавился и начал испаряться. Затем сила тока в печи понижается до значения, обеспечивающего ровный ход испарения материала.

Для получения фотоэлементов с хорошими параметрами необходимо, чтобы толщина слоя полупроводника равнялась 0,1 *мм*.

Нанесение полупроводникового слоя методом испарения в вакууме обеспечивает точное получение заданной толщины слоя и хорошее его прилегание к шероховатой поверхности диска: летящие молекулы или атомы испаряемого вещества заполняют все мельчайшие углубления и шероховатости поверхности, в результате чего создается надежный электрический контакт с небольшим сравнительно значением величины переходного сопротивления на границе металл — полупроводник.

Нанесенный таким способом селен находится в аморфной модификации, имеет весьма высокое удельное сопротивление и еще не обладает нужными фотоэлектрическими свойствами. Поэтому на следующей стадии технологического процесса селен переводится из аморфной модификации в кристаллическую, обладающую большой светочувствительностью. Для этой цели диск с нанесенным на него селеном, вынутый из-под колпака, сразу вносится в печь, предварительно нагретую до температуры 160—170° С. Вскоре начинается кристаллизация селена, сопровождающаяся изменением его черной окраски на серую. После приобретения всей поверхности селена серой окраски накал печи повышается, ее температура доводится до 200—210° С и будущий фотоэлемент выдерживается в течение полутора-двух часов при этой температуре.

К верхнему полупрозрачному металлическому электроду предъявляются два основных требования. Во-первых, он должен быть достаточно прозрачен в соответствующей области спектра, и, во-вторых, во избежание бесполезных потерь должен обладать высокой электрической проводимостью.

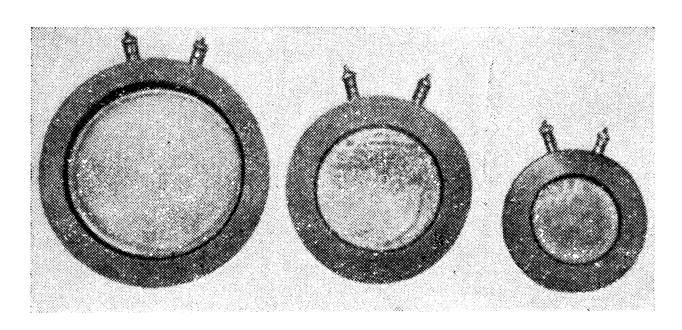
Опыт показал, что наилучшие результаты получаются тогда, когда верхний электрод наносится методом катодного распыления.

При этом верхний электрод находится под высоким положительным потенциалом. Распыляемый материал, находящийся под отрицательным потенциалом, подвергается бомбардировке положительными ионами аргона вследствие возникновения газового разряда в колоколе, наполненном аргоном под давлением 0,1—0,15 *мм* рт. ст.

В процессе катодного распыления поверхность селена нагревается. Во избежание перегрева распыление ведется

короткими периодами продолжительностью в 10—12 сек. с перерывом по 3—5 мин.

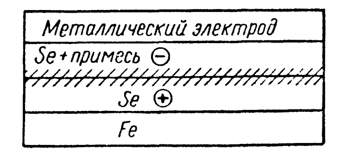
Готовые, очувствленные диски фотоэлемента собираются в эбонитовую или пластмассовую оправку с выведенными наружу двумя зажимами. Внешний вид селеновых фотоэлементов представлен на фиг. 35.



Фиг. 35. Селеновые фотоэлементы.

Для предохранения светочувствительной поверхности фотоэлемента от вредного влияния окружающей среды она покрывается пленкой прозрачного лака.

Технология изготовления селенового фотоэлемента построена таким образом, что в процессе нанесения на селеновый слой верхнего металлического электрода некоторое количество атомов наносимого металла диффундирует вглубь селена. Благодаря этому часть селенового слоя, на глубину которого проникают атомы металла, приобретает электронный механизм проводимости. Таким образом, в селеновом фотоэлементе осуществляется контакт электронного селена с дырочным. Между ними, как это показано на фиг. 36, образуется запирающий слой. При освещении фотоэлемента в наружном селеновом слое образуются электронно-дырочные пары. Электроны концентрируются у верхнего электрода, а дырки проходят через запирающий слой к нижнему электроду, заряжая его положительно.

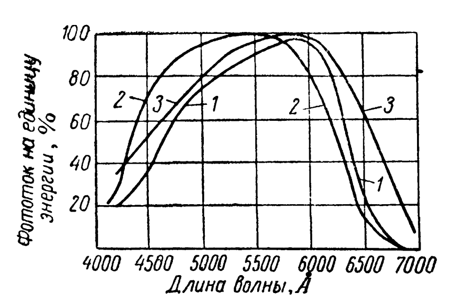


Фиг. 36. Схематическое строение селенового фотоэлемента (заштрихованная область — запирающий слой).

Селеновые фотоэлементы имеют спектральную чувствительность, захватывающую практически всю видимую

область спектра. Добавление к селену примесей несколько изменяет спектральные характеристики. На фиг. 37 представлены три спектральные характеристики селенового фотоэлемента. Первая из них относится к чистому селену *1*, вторая — к селену с примесью серы *2*, а третья — к селену с примесью теллура *3*. Максимум чувствительности беспримесного селенового фотоэлемента лежит в области 5 900 Å.

Интегральная чувствительность этого фотоэлемента превосходит чувствительность всех обычных фотоэлементов с внешним фотоэффектом и достигает значений порядка 500 *мка/лм.*



Фиг. 37. Спектральные характеристики селеновых фотоэлементов.

У всех вентильных фотоэлементов сила возникающего фототока зависит не только от интенсивности светового потока, но и от величины внешнего сопротивления.

Частотная характеристика селеновых фотоэлементов значительно хуже, чем у фотоэлементов с внешним фотоэффектом, поэтому применение их для звуковоспроизведения нецелесообразно.

Открытие фотоэффекта запирающего слоя и последующее изобретение на этой основе вентильных фотоэлементов сыграли в науке и технике исключительную роль. Ни фотоэлементы с внешним фотоэффектом, ни особенно фотосопротивления не могут быть причислены к приборам, превращающим лучистую энергию в электрическую энергию, в то время как вентильные фотоэлементы под воздействием света приобретают способность создавать собственную электродвижущую силу. Следовательно, только фотоэлементы с запирающим слоем являются теми замечательными приборами, при помощи которых лучистая энергия непосредственно, прямым путем переходит в энергию электрическую.

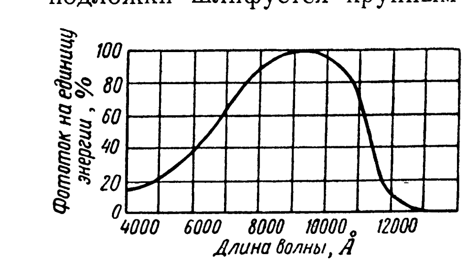
СЕРНОТАЛЛИЕВЫЕ ФОТОЭЛЕМЕНТЫ

В 1938 Б. Т. Коломийцем был разработан серноталлиевый фотоэлемент с запорным слоем.

До 1938 г. лучший фотоэлемент с запирающим слоем — селеновый, обладал чувствительностью не более 500 *мка/лм*

и малым к. п. д., не превышавшим 0,1%. Появление серноталлиевого фотоэлемента явилось крупным шагом вперед.

Принципиальная технология изготовления серноталлиевых фотоэлементов несложна. Сначала путем сплавления таллия и серы приготовляется Tl_2S. Важно при этом, чтобы компоненты сплава были бы по возможности химически чистыми. Затем этот сплав испарением в вакууме при температуре около 600° С наносится на железную подложку круглой формы. Перед нанесением слоя одна поверхность подложки шлифуется крупным карборундом для создания шероховатостей. Это необходимо для лучшего сцепления подкладки с наносимым на нее полупроводниковым слоем. Для того чтобы фотоэлементы получились вполне доброкачественными, слои нужно осаждать на подкладку, нагретую до температуры 400° С. В результате слой Tl_2S приобретает четко выраженную кристаллическую структуру. Чем больше размеры отдельных кристаллов, тем выше будут значения чувствительности и электродвижущей силы фотоэлемента.



Фиг. 38. Спектральная характеристика серноталлиевого фотоэлемента.

После нанесения слоя Tl_2S подложка вынимается из-под колокола вакуумной установки и подвергается прогреву на воздухе, что приводит к частичному окислению, необходимому для придания полупроводниковому слою необходимых свойств.

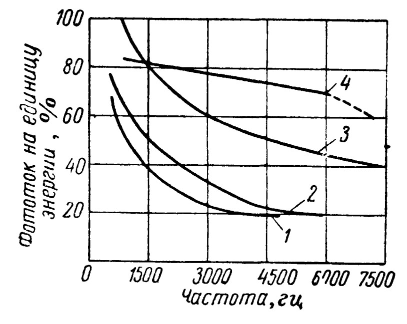
Затем на поверхность Tl_2S методом катодного распыления наносится полупрозрачный слой золота — электрод. Во избежание вредного влияния окружающей среды, и особенно влажности, поверх золотого электрода наносится пленка прозрачного лака. Затем вся система заключается в стеклянный баллон, из которого откачивается воздух. По достижении вакуума 10^{-5} *мм* рт. ст. в баллон напускается водород до давления 300—400 *мм* рт. ст. и фотоэлемент отпаивается от вакуумной установки. В зависимости от назначений серноталлиевые фотоэлементы изготовляются различных форм и размеров.

Серноталлиевые фотоэлементы обладают весьма высокими показателями. Их интегральная чувствительность до-

стигает числа в 10 000 *мка/лм*, т. е. в 20 раз превышает чувствительность селеновых фотоэлементов; к. п. д. серноталлиевого фотоэлемента также относительно высок и в отдельных экземплярах доходит до 1,1%.

Спектральная чувствительность серноталлиевого фотоэлемента, как показано на фиг. 38, захватывает широкий участок спектра, а ее максимум находится в ближней инфракрасной области.

Серноталлиевый фотоэлемент обладает еще одним достоинством: возникающий у него фототок прямо пропорционален интенсивности светового потока. Правда, эта пропорциональность сохраняется только в том случае, когда сопротивление внешней цепи достаточно мало.



Фиг. 39. Частотные характеристики вентильных фотоэлементов.

1 — селенового; *2* — меднозакисного; *3* и *4* — серноталлиевых.

Частотная характеристика серноталлиевых фотоэлементов, как это видно из фиг. 39, значительно лучше характеристик других вентильных фотоэлементов, что позволило применить их для звуковоспроизведения.

СЕРНИСТОСЕРЕБРЯНЫЕ ФОТОЭЛЕМЕНТЫ

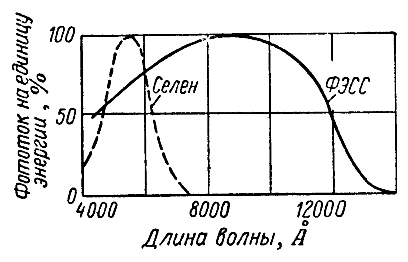
В 1941 г. были разработаны вентильные фотоэлементы из сернистого серебра (Ag_2S). Сернистосеребряные фотоэлементы выпускаются под марками ФЭСС-У2, ФЭСС-У3 и ФЭСС-У10. В этой маркировке число обозначает размер рабочей площади фотоэлемента в квадратных сантиметрах.

Интегральная чувствительность ФЭСС очень велика и в отдельных экземплярах доходит до 8 600 *мка/лм*. Если же брать обычные значения чувствительности, то они, как правило, лежат в пределах от 6 000 до 7 000 *мка/лм* при источнике света в 2 360° абсолютной шкалы. Фотоэлектродвижущая сила этих фотоэлементов при освещенности 25 люкс доходит до 0,16 *мв*.

Сернистосеребряные фотоэлементы достаточно стабильны в работе и не подвергаются сильному старению, ограничивающему их дальнейшее использование. Старение ФЭСС заключается в том, что с течением времени возра-

стает их внутреннее сопротивление, а фототок короткого замыкания при этом уменьшается.

Сернистосеребряные фотоэлементы имеют довольно широкую спектральную чувствительность в пределах от 4 000 до 12 000 Å с максимумом чувствительности в ближней инфракрасной области (8 000—9 000 Å). На фиг. 40 изображена спектральная характеристика ФЭСС и для сравнения спектральная характеристика обычного селенового фотоэлемента.



Фиг. 40. Спектральная характеристика ФЭСС.

В отличие от серноталлиевого фотоэлемента зависимость фототока от интенсивности светового потока у ФЭСС имеет линейный характер лишь в ограниченном диапазоне малых освещенностей, до 100—120 люкс.

Сернистосеребряные фотоэлементы обладают значительной инерционностью.

СОЛНЕЧНАЯ БАТАРЕЯ

Так назвали новый кремниевый фотоэлемент. Этот фотоэлемент создан в 1953 г. и представляет собой преобразователь лучистой энергии в электрическую с очень большим для этого класса приборов к. п. д., достигающим 6%.

Кремний — элемент, обладающий полупроводниковыми свойствами, расположенный в IV группе периодической системы, второй по распространенности элемент в природе. Атомный вес его 28,06, а порядковый номер 14. Температура плавления кристаллического кремния 1 415° С, а температура кипения 2 360° С. Электропроводность кремния в зависимости от сорта и числа введенных в него примесей колеблется в довольно широких пределах, от $7 \cdot 10^2$ до 10^{-2} *ом*$^{-1}$ · *см*$^{-1}$. Последнее число отвечает удельной электропроводности чистого кремния. Как и три других элемента IV группы, кремний обладает решеткой типа алмазной.

В течение уже сравнительно многих лет кремний является объектом всесторонних физических исследований. В последние годы физики главное свое внимание сконцентрировали на изучении его электрических свойств. В итоге многолетних исследовательских работ были получены резуль-

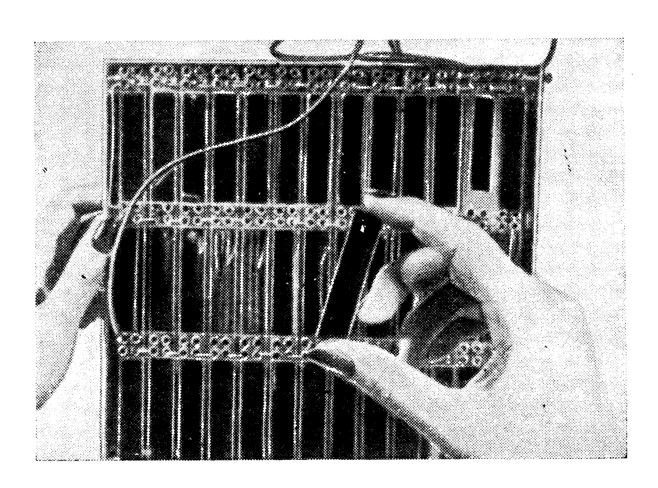
таты, представляющие большую ценность как для теории, так и для практики. Среди этих результатов большое значение имеет метод получения кремния с наперед заданным механизмом проводимости — электронным или дырочным, позволивший разработать кремниевые детекторы. Таким же важным результатом, несомненно, следует считать разработку технологии введения в монокристалл кремния примесей посторонних атомов, позволяющей получать в одном кристалле $p - n$-переход, на основе которого и был создан кремниевый фотоэлемент с запорным слоем.

Технология изготовления кремниевого фотоэлемента довольно сложна. Она сводится в основном к следующим операциям. Сначала из расплавленного кремния выращивают большие монокристаллы. Выращивание монокристаллов может осуществляться разными способами. Один из них заключается в том, что в расплавленный кремний погружается затравка и очень медленно подымается вверх. Затравка, т. е. небольшой монокристаллик данного вещества, представляет собой кристаллизационный центр, вокруг которого начинается кристаллизация. В процессе медленного подъема затравки начинается постепенное образование монокристалла кремния, который может быть получен достаточно больших размеров. Весь этот процесс проводится в условиях высокого вакуума. Нагрев кремния осуществляется индукционной высокочастотной печью.

Полученные кремниевые монокристаллы разрезают на тонкие пластинки прямоугольной формы. Пластинка обладает электронным механизмом проводимости. Для создания же фотоэлемента с запорным слоем необходима система из двух полупроводников с противоположными механизмами проводимости. Для этого одну из поверхностей пластинки покрывают тонким равномерным слоем бора и в течение некоторого времени прогревают пластинку в электрической печи при непрерывной работе вакуумных насосов. Время диффузионного прогрева подбирается таким образом, чтобы атомы бора за это время успели продиффундировать внутрь пластинки лишь на часть ее толщи. Так как примесь бора к кремнию сообщает последнему дырочную проводимость, то в результате одна часть кремниевой пластинки будет обладать дырочной проводимостью, а вторая часть — электронной. На границе между одной и другой частями образуются $p - n$-переход и как следствие этого запорный слой. На обеих поверхностях кремниевой пластинки создаются специальным методом металлические электроды, один из

которых — полупрозрачный. Затем пластинка помещается в оправку с двумя токовыми выводами.

Отдельные фотоэлементы можно соединять друг с другом последовательно и параллельно, получая таким образом фотоэлектрическую батарею, внешний вид одного из



Фиг. 41. Внешний вид „солнечной" батареи.

образцов которой изображен на фиг. 41. Подобную батарею можно использовать в неэлектрифицированных районах для питания переносных радиоприемников и передатчиков, телефонных станций и т. п. Даже при уже существующем уровне полупроводниковой техники кремниевые фотоэлементы позволяют получать в ясный солнечный день до 50 *вт* электроэнергии с каждого квадратного метра поверхности фотоэлемента, т. е. имеют к. п. д. около 6%. Для правильной оценки возможностей фотоэлементов с запорным слоем достаточно напомнить, что паровые двигатели имеют к. п. д. порядка 6—8%. Кроме того, следует иметь в виду, что в отличие от других преобразователей энергии срок службы полупроводниковых фотоэлементов может быть весьма большим, а в некоторых случаях — практически безграничным.

ФОТОЭЛЕМЕНТ ИЗ СУЛЬФИДА КАДМИЯ

Почти одновременно с изобретением кремниевого фотоэлемента был изобретен новый фотоэлемент с запирающим слоем из сульфида кадмия (CdS).

Высокие фотоэлектрические свойства сульфида кадмия были известны физикам сравнительно давно.

Структура фотоэлемента из CdS принципиально ничем не отличается от структуры любого другого вентильного фотоэлемента. Сложность разработки этого фотоэлемента заключалась в образовании в толще кристалла *p* — *n*-перехода. Введением соответствующих примесей удалось в монолитном кристалле получить две контактирующие друг с другом области: электронную и дырочную, что, как известно, приводит к образованию запирающего слоя.

Первые образцы фотоэлементов из CdS имели небольшие размеры. Фоточувствительная поверхность каждого из них не превышала 4 *см*², что лимитировало величину развиваемой фотоэлементом электрической мощности.

На обе поверхности фотоэлемента наносятся металлические электроды: один — серебряный, другой — индиевый.

В одном из опытных образцов площадью всего лишь в 0,8 *см*² при освещении его прямым солнечным светом фотоэлектродвижущая сила достигала значения 0,3 *в* и по утверждению изобретателей этого фотоэлемента может быть повышена до 2—2,5 *в*; к. п. д. этого фотоэлемента по теоретическим расчетам должен быть около 18%. По заявлению журнала, опубликовавшего сообщение о фотоэлементе из CdS, преобразовательная способность генератора представляется настолько большой, что пластина кристалла толщиной с вафлю и размером 1,2 $\times$ 4,5 *м*, лежащая на крыше дома или вмонтированная в нее, сможет, по представлениям конструкторов, отдать энергию, достаточную для того, чтобы круглосуточно обеспечивать освещение, отопление, холодильники и прочие удобства небольшого жилого дома.

В связи с этими разработками небесполезно мысленно перенестись на 25 лет назад. Напомним, что в отличие от наших дней в то время физики полупроводников еще не существовало. Тем не менее еще тогда акад. А. Ф. Иоффе, давая правильную оценку перспективных возможностей фотоэлементов с запирающим слоем, утверждал, что превращение лучистой энергии в электрическую с большим к. п. д. должно осуществляться при посредстве полупроводниковых фотоэлементов.

По современным теоретическим представлениям, предельный к. п. д. вентильных фотоэлементов должен достигать 40—50%.

Реализация этих возможностей позволила бы человечеству использовать новые неисчерпаемые источники энергии.

ГЕРМАНИЕВЫЕ ФОТОДИОДЫ

Как уже упоминалось, все вентильные фотоэлементы применяются в таком режиме, который не предусматривает включение в цепь фотоэлемента источника напряжения. Вентильные фотоэлементы сами являются источниками электродвижущей силы, на использовании которой и построены многие фотоэлектрические схемы. Тем не менее, еще в 1953 г. было доказано, что в ряде случаев целесообразно вентильный фотоэлемент применять в таких схемах, в которых предусматривается последовательное с фотоэлементом включение источника сравнительно высокого напряжения, приложенного в запирающем направлении. Фотоэлемент, работающий в подобном режиме, получил название фотодиода.

Так как к фотодиоду в запирающем направлении прикладывается сравнительно высокое напряжение, то для этой цели пригоден далеко не всякий вентильный фотоэлемент. Известно, что у всех существующих вентильных фотоэлементов уже сравнительно небольшое обратное напряжение вызывает пробой. Поэтому изобретатель фотодиода Дж. Шайв построил его из высокоомного германия. Прибор этот получил название фотодиода лишь потому, что его конструкция, как впрочем и конструкция всех других типов вентильных фотоэлементов, в своей самой главной части не отличается от конструкции германиевого плоскостного диода.

Германиевый фотодиод устроен следующим образом. В монокристалле германия путем введения в него соответствующих примесей создаются две области p и n, между которыми образуется запорный слой. На одну поверхность монокристалла наносится полупрозрачный металлический электрод, на другую — сравнительно массивный электрод. Монокристалл монтируется в оправку с двумя токовыми выводами и окошком.

Механизм действия фотодиода таков же, как и механизм действия любого вентильного фотоэлемента. Допустим, что на n-германий падает световой поток. Под его действием в n-слое создаются электронно-дырочные пары. Под влиянием контактного поля запирающего слоя дырки переходят через запирающий слой в p-германий, заряжая его положительно. В отсутствии внешнего электрического поля переход неосновных фотоносителей скоро прекращается и между верхним и нижним электродами появляется некоторая

разность потенциалов. Приложенное к фотодиоду в запирающем направлении внешнее электрическое поле еще более усиливает переход неосновных фотоносителей из n-германия в p-германий. Это происходит потому, что запирающее направление соответствует тому случаю, когда к n-германию подводится провод от положительного полюса генератора, а к p-германию — от отрицательного.

Переход дырок из n-германия в p-германий будет определяться в новых условиях величиной приложенного электрического поля, которое значительно больше контактного поля на $p - n$-переходе.

Когда фотодиод включается в какую-нибудь цепь с сопротивлением R, текущий в этой цепи ток может создавать на сопротивлении R значительное падение напряжения, близкое по своей величине к величине напряжения, создаваемого включенной в цепь фотодиода батареей.

Включение в цепь фотодиода сравнительно высокого внешнего напряжения порядка нескольких десятков вольт дает возможность получать большую чувствительность по напряжению.

Германиевые фотодиоды имеют высокую интегральную чувствительность, доходящую до 40 000 *мка/лм*. Максимум их чувствительности лежит в инфракрасной области спектра, соответствующей длине волны около 15 000 Å.

ПРИМЕНЕНИЯ ФОТОСОПРОТИВЛЕНИЙ И ФОТОЭЛЕМЕНТОВ

Области применений фотоэлектрических устройств с каждым годом все более и более расширяются. Современный технический прогресс, непосредственно связанный с интенсивным развитием автоматики, в значительной степени обусловлен успехами практической и теоретической электроники.

Представляя большой интерес для теоретической физики, фотоэффект, с другой стороны, принадлежит к одному из многочисленных физических явлений, нашедших широкое применение в самых разнообразных областях техники. Фотоэлемент в наше время стал одним из распространенных и подчас незаменимых приборов. Благодаря широкому внедрению его в технику зазвучало кино, повысилась безопасность труда, осуществлена автоматизация многих производственных процессов, осуществилось телевидение и т. д.

Фотоэлементы выполняют многочисленные функции: сортируют всевозможные изделия, отбраковывают недоброкачественную продукцию, регулируют движение транспорта, следят за правильным горением топлива, регулируют температуру печей, автоматически включают и выключают уличное освещение и свет бакенов, несут надежную, недремлющую охрану, сигнализируют о начавшемся пожаре, предупреждают аварии на железнодорожном транспорте.

Также широко используются фотоэлементы и в научной практике. Применение фотоэлектрических приборов и схем в лаборатории оказывается исключительно эффективным. Важнейшие, ранее трудно разрешимые задачи получают с помощью фотоэлектрических устройств изящное и простое решение. Существуют целые отрасли науки, в которых фотоэлементы оказались незаменимым инструментом при исследовании новых явлений природы. Применение фотометров с фотоэлементами, электронными умножителями, использующими принцип усиления фототока за счет вторично-электронной эмиссии, счетчиков фотонов и других чувствительных фотоэлектрических устройств позволило за последние годы получить новые данные о ядерных процессах, о свечении верхних слоев атмосферы, о рассеянии света молекулами, о строении галактики и т. д.

В многочисленных фотоэлектрических схемах используются главным образом два свойства фотоэлемента: зависимость фототока от интенсивности светового потока и возникновение тока от действия света. Прежде чем перейти к конкретным примерам практических применений фотоэлементов, напомним, что ток, возникающий под действием света у фотоэлемента, сравнительно мал. Заметим далее, что фотоэлектрическое устройство часто содержит помимо фотоэлемента электромагнитное реле. Комбинация электромагнитного реле с фотоэлементом и с ламповым усилителем, усиливающим фототоки, называется фотореле.

В схемах с электромагнитным реле, последнее всегда связано с внешней электрической цепью, которую реле либо замыкает, либо размыкает.

Фотоэлемент в технике безопасности. Фотореле широко применяется для предупреждения несчастных случаев. Опасное место пересекается световым лучом, который освещает расположенное сбоку фотореле. До тех пор пока на фотоэлемент падают световые лучи, в схеме фотореле непрерывно идет ток — якорь протянут к железному сердеч-

нику электромагнитного реле. Когда освещение прекращается, ток перестает течь, якорь отскакивает от железного сердечника и замыкает внешнюю цепь, приводящую в действие тормозящее устройство. Поэтому если, например, в опасную зону под пресс случайно попадет рука рабочего, она пересечет световой пучок и пресс остановится.

Автоматический счет изделий. На фабриках и заводах, где изготовляются в большом количестве стандартные изделия, необходимо учитывать их число. В ряде случаев счет изделий нельзя производить механическими контактными счетчиками. Это относится, например, ко всем раскаленным металлическим изделиям. Современный автоматический фотоэлектрический счетчик считает с одинаковой точностью любые предметы: большие и маленькие, холодные и горячие. Принцип устройства подобного приспособления весьма прост. С одной стороны конвейерной ленты помещается лампочка с линзой, с другой — фотореле. Узкий световой пучок пересекается движущимися на конвейере изделиями. Фотореле приводит в действие электрический, быстродействующий счетчик, подсчитывающий передвигающиеся изделия. Так подсчитываются брикеты мороженого, куски мыла, коробки спичек и т. п.

Автоматическое управление прокатным станом. Фотоэлемент нашел применение и в металлургической промышленности, в частности, для управления прокатными станами. Для этого по одну сторону от вальцов находится источник света, посылающий почти параллельный световой поток, по другую же — фотореле. Когда прокатываемая деталь — болванка, балка или рельс — пересекает световой пучок, фотореле срабатывает и включает механизм, вызывающий обратное движение вальцов.

Сигнализатор и регулятор уровня жидкости. Существует несколько способов, дающих возможность с большой степенью точности автоматически регулировать постоянство уровня жидкости в баках с помощью фотореле. При осуществлении одного из способов на двух противоположных стенках бака на заданном уровне делаются два маленьких стеклянных окошечка. В одно окошко направляется световой пучок, а у второго — устанавливается фотоэлемент, соединенный с усилительной схемой, — фотореле. На поверхности жидкости в баке плавает поплавок. С помощью несложного приспособления поплавок всегда фиксируется на середине поверхности жидкости. По мере того как жидкость расходуется, поплавок опускается все ниже и ниже. На-

конец, поплавок опустится до уровня светового потока и пересечет его, что вызовет срабатывание фотореле. Фотореле приведет в действие механизм, открывающий кран, через который бак будет наполняться жидкостью. Повышение уровня жидкости выше верхнего края светового потока автоматически закроет кран. Аналогичное устройство применяется также для контроля и сигнализации высоты уровня заполнения чанов, бункеров, ящиков и других специальных ёмкостей сыпучими материалами. В этом случае необходимость в поплавке отпадает. Световой луч пересекается самой массой сыпучего вещества: песком, углем, зерном, мукой и т. д.

Контроль твердости. Для контрольной проверки качества изделий часто употребляются специальные фотоэлектрические приборы, например, при посредстве фотоэлемента бракуются по твердости поршневые пальцы для моторов. Когда палец проходит по конвейерной ленте, на него падает небольшой стальной молоточек и отскакивает от пальца вверх. Если палец по своей твердости удовлетворяет норме, молоток подпрыгнет на определенную высоту и пересечет луч фотореле. Пересечение светового луча вызовет быстрое срабатывание реле, которое приведет в действие механизм, проталкивающий палец дальше по конвейеру. Если твердость пальца меньше положенной, молоточек при ударе подскочит недостаточно высоко и срабатывания реле не произойдет. Тогда при помощи особого приспособления забракованный палец будет выброшен в ящик. Такой автомат пропускает до 2 000 пальцев в час.

Прибор для испытания металлических листов. С помощью фотоэлектрического устройства осуществляется проверка металлических листов на наличие в них мелких отверстий и трещин. С одной стороны листа движется световой луч, с другой стороны — синхронно с лучом движется фотоэлемент. Луч с фотоэлементом подвергают обследованию всю поверхность листа. Когда попадается отверстие или трещинка, включается сигнальное устройство.

Фотоэлектрический термостат. Внутрь термостата через специальное отверстие в его крышке опускается шарик термометра. Световой поток от электрической лампочки при помощи выпуклой линзы фокусируется на термометр так, чтобы он приходился на уровне ртутного столба, соответствующего заданной температуре. По другую сторону от термометра, как раз против светового пучка, помещается фотоэлемент с усилительной схемой. Если температура в

термостате повысится, поднявшийся ртутный столбик закроет доступ света к фотоэлементу, что вызовет срабатывание реле, а следовательно, выключение тока. Через некоторое время температура термостата опустится до заданной — ртутный столбик снова займет свое прежнее положение, а световой поток опять попадет на поверхность фотоэлемента. В результате фотореле включит электрический ток и термостат станет нагреваться.

Такая схема может быть сделана очень чувствительной, реагирующей на изменение температуры в одну десятую градуса. Кроме того, она позволяет очень просто, поднятием или опусканием термометра, менять задаваемую для регулировки температуру.

Нефелометр. Для определения прозрачности жидкостей или газов применяется специальный прибор, названный нефелометром. Устройство объективного нефелометра с фотоэлементом основано на пропускании лучей от светового источника через линзу и сосуд с испытуемым веществом. Параллельный световой поток попадает на фотоэлемент, включенный в схему. Величина прозрачности, выраженная в относительных единицах, определяется как отношение измеренного при этом фототока к фототоку, развиваемому фотоэлементом при его непосредственном освещении.

Фотоэлектрическая фотометрия. Фотоэлементы применяются также широко в фотометрии. Пропорциональная зависимость фототока от интенсивности падающего света, имеющая место у некоторых фотоэлементов, делает их исключительно ценными приборами для этой цели.

Для измерения освещенности в зависимости от времени суток и от метеорологических условий разработаны различные конструкции фотоэлектрических объективных регистрирующих фотометров.

Для фотометрирования дневного света необходимо применять такие фотоэлементы, спектральная чувствительность которых совпадает с кривой видимости глаза.

С помощью фотоэлементов фотометрируется свет далеких звезд. Фотоэлементы, чувствительные к ультрафиолетовой области спектра, применяются для фотометрирования ультрафиолетовой радиации.

Фотографический экспонометр. Экспонометр представляет собой селеновый фотоэлемент с запирающим слоем, смонтированный вместе с чувствительным стрелочным милливольтметром в один футляр. Перед съемкой поверхность фотоэлемента направляют на снимаемый объект.

В соответствии с интенсивностью освещенности будут изменяться показания гальванометра экспонометра, на шкале которого указано время экспозиции.

Фотоэлектрический бакенщик. Как известно, на судоходных реках бакенщик дважды в сутки на лодке подъезжает к бакенам, зажигает, а затем при наступлении рассвета тушит фонари. Всю эту работу может выполнить фотоэлемент. Для этого на бакен устанавливается фотореле. Когда наступают сумерки, фотореле автоматически включает электрическое освещение. С наступлением рассвета при определенной освещенности фотореле выключает лампочку.

Фотоэлемент в звуковом кино. В звуковом кино воспроизведение звука не может быть осуществлено без фотоэлемента.

Рассмотрим принципиальную схему этого процесса.

Узкий световой пучок, исходящий от электрической лампочки, проектируется на звуковую дорожку кинопленки. Пройдя сквозь пленку, световой луч попадает на фотоэлемент. При движении ленты освещение фотоэлемента изменяется в соответствии с изменением прозрачности кинопленки. В результате сила и частота фототока будут строго соответствовать интенсивности и частоте записанных звуковых колебаний. Этот ток затем усиливается и подается на громкоговоритель.

Приведенными примерами применения фотоэлементов не исчерпываются.

Фотоэлементы применяются для автоматического взвешивания, автоматического открывания и закрывания дверей, контроля размеров деталей, автоматического фотографирования, в газоанализаторах и во многих других случаях.

ГЛАВА ПЯТАЯ

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ТЕРМОСОПРОТИВЛЕНИЯ

ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ И ХАРАКТЕРИСТИКИ

Значительная зависимость сопротивления полупроводников от температуры позволила сконструировать чувствительные термосопротивления, названные термисторами, представляющей собой объемные полупроводниковые сопротивления с большим температурным коэффициентом сопротивления. В зависимости от назначений термосопротивления

изготовляются из веществ с различным значением удельного сопротивления ρ. Для изготовления термосопротивлений могут применяться полупроводники как с электронным, так и с «дырочным» механизмом проводимости и беспримесные вещества. Основными параметрами вещества термосопротивления, определяющими его качество, являются: величина температурного коэффициента γ, химическая стабильность и температура плавления.

Большинство типов термисторов надежно работает лишь в определенных температурных пределах. Всякий перегрев свыше нормы пагубно действует на термосопротивление, а иногда даже может привести к его гибели.

Для предохранения от вредного влияния окружающей среды, и в первую очередь кислорода воздуха, термосопротивления иногда помещаются в баллон, наполненный инертным газом.

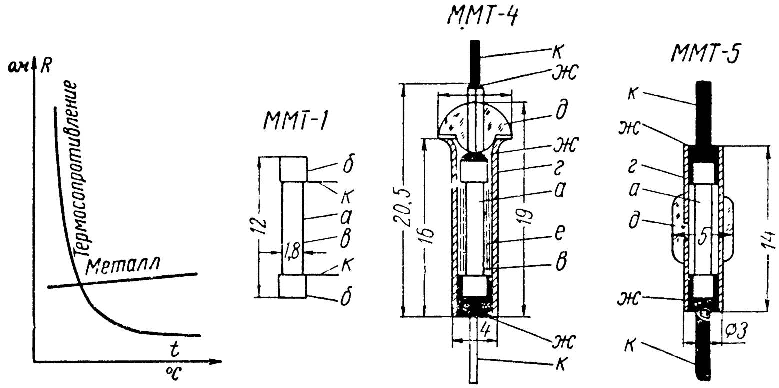
Конструкция термосопротивления весьма несложна. Кусочку полупроводника придается форма нити, бруска, прямоугольной пластинки, шарика или какая-нибудь иная форма. На противоположных частях термосопротивления вмонтированы два вывода. Величина омического сопротивления термистора, как правило, заметно больше величин сопротивлений других элементов схемы и, что самое главное, резко зависит от температуры. Поэтому когда в схеме течет ток, его величина в основном определяется величиной омического сопротивления термистора или в конечном счете его температурой. С повышением температуры термистора ток в схеме увеличивается, и, наоборот, с понижением температуры ток уменьшается.

Нагрев термостата может осуществляться передачей тепла от окружающей среды, выделением тепла в самом термисторе при прохождении через него электрического тока или, наконец, при помощи специальных подогревных обмоток. Способ нагрева термосопротивления непосредственным образом связан с его практическим использованием.

Сопротивление термистора с изменением температуры может изменяться на три порядка, т. е. в 1 000 раз. Это характерно для термисторов, изготовленных из плохо проводящих материалов. В случае хорошо проводящих веществ отношение $R_{макс}/R_{мин}$ находится в пределах десяти.

Всякое термосопротивление обладает тепловой инерционностью, которая в одних случаях играет положительную роль, в других — либо не имеет практически никакого зна-

чения, либо отрицательно сказывается и ограничивает пределы использования термосопротивлений. Тепловая инерция проявляется в том, что термистор, подвергающийся нагреву, не сразу принимает температуру нагревателя, а лишь через некоторое время. Характеристикой тепловой инерции термосопротивления может служить так называемая постоянная времени β. Постоянная времени численно равна



Фиг. 42. Температурная зависимость термосопротивления и металла.

Фиг. 43. Конструкция термосопротивлений и их размеры.

а — тело термосопротивления; *б* — контактные колпачки; *в* — слой эмалевой краски, *г* — защитный металлический чехол; *д* — стеклянный изолятор; *е* — металлическая фольга; *ж* — слой олова; *к* — выводы.

тому количеству времени, в течение которого термистор, ранее находившийся при 0° С, а затем перенесенный в среду с температурой 100° С, уменьшит свое сопротивление на 63%.

Для большинства полупроводниковых термосопротивлений зависимость сопротивления от температуры имеет нелинейный характер (фиг. 42). Тепловая инерция термосопротивления мало отличается от инерции ртутного термометра.

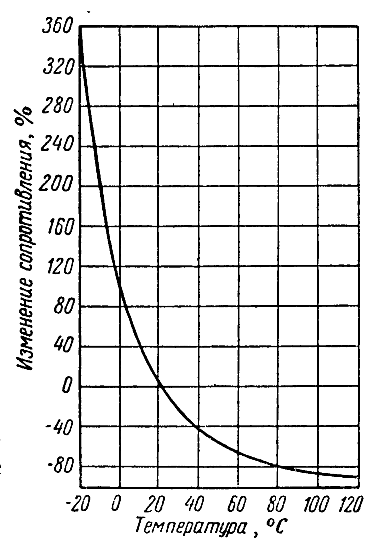
При нормальном режиме эксплуатации параметры термосопротивлений с течением времени меняются мало, а поэтому срок их службы достаточно велик и в зависимости от марки термосопротивления колеблется в интервале, верхний предел которого исчисляется несколькими годами.

Рассмотрим для примера кратко три типа термосопротивления: ММТ-1, ММТ-4 и ММТ-5.

На фиг. 43 показаны принципиальное устройство и конструкции этих термосопротивлений. Термосопротивление

ММТ-1 покрыто снаружи эмалевой краской и предназначено для работы в сухих помещениях; термосопротивления ММТ-4 и ММТ-5 смонтированы в металлических капсулях и герметизированы. Поэтому они не подвержены вредному влиянию окружающей среды, предназначены для работы в условиях любой влажности и даже могут находиться в жидкостях (не действующих на корпус термосопротивлений).

Омическое сопротивление термосопротивлений находится в диапазоне от 1 000 до 200 000 *ом* при температуре 20° С, а температурный коэффициент γ около 3% на 1° С. На фиг. 44 изображена кривая, показывающая в процентах изменение омического сопротивления термистора в зависимости от его температуры. На этом графике за начальное значение принято сопротивление при 20° С.



Фиг. 44. Температурная зависимость сопротивления термистора типа ММТ.

Описываемые типы термосопротивлений рассчитаны на работу в температурном интервале от —100 до +120° С. Перегрев их недопустим.

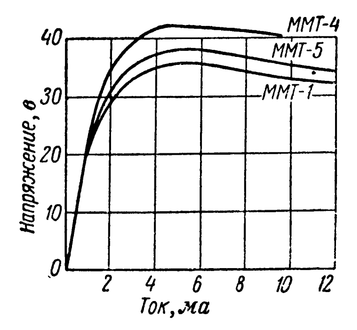
Термосопротивления упомянутых типов весьма стабильны, т. е. сохраняют практически неизменным свое «холодное» сопротивление, величина которого определяется при 20° С в течение весьма длительного времени. Высокая стабильность термосопротивлений типа ММТ определяет их большой срок службы, который, как указано в паспорте, «в нормальном режиме их работы практически безграничен». Термосопротивления типа ММТ обладают хорошей механической прочностью.

Вольтамперные характеристики термосопротивлений, снятые в статическом режиме при температуре окружающей среды в 20° С, представлены на фиг. 45.

Помимо рассмотренных типов термосопротивлений широкое распространение получили термисторы типа ТОС. Конструктивно они оформлены в виде таблетки толщиной около 1 *мм* и диаметром около 4 *мм*. Выводы выполнены

в виде проволочек, вмонтированных в боковые части таблетки.

Измерительные термисторы, выпускаемые нашей промышленностью под марками Т8Д, Т8С, Т9 обладают сравнительно малой тепловой инерцией. Они устроены следующим образом. К маленькому шарику из полупроводникового вещества прикрепляются тонкие вольфрамовые выводы. Шарик с выводами помещается в маленький стеклянный баллон, диаметр которого равен 3 *мм*, а длина от 7 до 9 *мм*. В торцевые части баллона впаяны более толстые проволочки, которые надежно соединяются с вольфрамовыми проволочками и являются, таким образом, внешними выводами термистора.



Фиг. 45. Вольтамперные характеристики термосопротивлений.

Термисторы типов ТП2/0,5; ТП2/2 и ТП2/6 выпускаются двух разновидностей: прямого и косвенного подогрева. Выполняются они в виде тонкой нити, укрепленной на двух вольфрамовых выводах, которые в свою очередь точечной электросваркой привариваются к двум проволочкам — траверзам. Последние впрессовываются в стеклянную ножку. Затем вся эта система помещается в стеклянный баллон.

В термисторах косвенного подогрева, сконструированных аналогичным образом, добавляется лишь нагревательная спираль, которая одевается на тело термистора, изолированного от спирали тонкой кварцевой трубочкой. Число выводов соответственно увеличивается.

Для решения ряда задач необходимо иметь термосопротивление с возможно малой инерционностью и малым размером. Эту сложную задачу удалось успешно решить в Ленинградском агрофизическом институте, создавшем несколько типов микротермосопротивлений «Игла». Конструктивно эти микротермосопротивления устроены следующим образом. Полупроводнику придается форма шарика диаметром от 5 до 50 *мкн*. В шарик вмонтированы два токовых электрода, выполненных из платиновой проволочки. Полупроводниковый шарик и платиновые электроды впрессованы в стекло. Толщина стеклянной пленки, обволакивающей полупроводниковый шарик, составляет всего 30—50 *мкн*.

На расстоянии примерно 2,5 *мм* от центра шарика платиновые проволочки при посредстве точечной электросварки соединяются с никелевыми выводами толщиной в 50—100 *мкн*. Для изоляции каждый из никелевых выводов помещен в стеклянный чулок. Длина стеклянного корпуса микротермосопротивления в зависимости от типа колеблется в пределах от 3 до 100 *мм*.

Таким образом, в рассматриваемой конструкции микротермосопротивления термочувствительным элементом является маленький полупроводниковый шарик, находящийся на одном конце стеклянного корпуса, длина которого в десятки, сотни и даже тысячи раз превышает диаметр самого шарика. Вот почему этот тип термосопротивления получил название «Игла».

Описанные микротермосопротивления обладают весьма малой инерционностью, порядка 0,02 сек., и могут работать в сравнительно широком температурном интервале, от —70 до +250° С.

Малые размеры и малая тепловая инерционность микротермосопротивлений послужили основанием для их широкого применения в самых различных областях науки и техники. Включенный в одно из плеч мостика Уитстона микротермистор позволяет с большой степенью точности и очень быстро измерять температуру. Таким методом, например, были определены температуры листьев многих растений, находящихся в разнообразных условиях существования, и изучены процессы их теплообмена с внешней средой. Микротермосопротивление можно вводить в кровеносные сосуды или в больной орган человека для ранней диагностики трудно распознаваемых заболеваний.

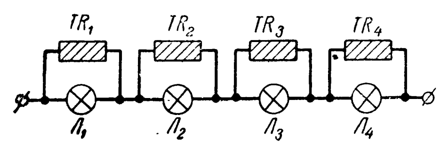
ПРИМЕНЕНИЯ ТЕРМОСОПРОТИВЛЕНИЙ

Из многочисленных применений термосопротивлений для иллюстрации приведем краткие описания лишь некоторых.

Ограничение пусковых токов. Для пуска шунтового электродвигателя, как известно, необходимо увеличивать силу тока постепенно. Для этого обычно применяется пусковой реостат, который плавно выводится по мере увеличения числа оборотов двигателя. В последние годы вместо пускового реостата все чаще применяется термосопротивление, включенное в цепь якоря двигателя. При подаче напряжения через якорь, а следовательно, и через термистор, течет ток. В термисторе выделяется тепло, его температура по-

вышается, а сопротивление падает. Падение сопротивления обусловливает нарастание тока, а вместе с тем и увеличение числа оборотов двигателя до тех пор, пока двигатель не войдет в свой обычный рабочий режим. Понятно, что возрастание тока не может происходить беспредельно, так как сила тока лимитируется сопротивлением цепи, куда входит и сопротивление якоря. Весь пусковой процесс длится в зависимости от типа сопротивления от 30 до 180 сек.

Рассмотренная принципиальная схема действия ограничителя пусковых токов — пример положительной роли большой тепловой инерции термосопротивления.



Фиг. 46. Схема шунтирующих термосопротивлений.

Реле времени. Описанная выше схема ограничителя тока воспроизводится в других вариантах для самых разнообразных целей, где термистор выполняет роль реле времени. Нередко термосопротивление комбинируется с электромагнитным реле, которое и является исполнительным механизмом. Достоинством реле времени с термосопротивлением является способность его с равным успехом работать как на постоянном, так и на переменном токе.

Температурный реостат. В некоторых схемах для регулировки тока на термосопротивление одевается подогревная обмотка накала, через которую проходит ток. В зависимости от силы тока катушка будет нагреваться больше или меньше, а вместе с ней и термосопротивление. Синхронно с изменением температуры термосопротивления будет изменяться и сила тока в его цепи.

Шунтирующее сопротивление. Существует довольно много схем, в которых приемники тока соединяются последовательно друг с другом. При таком способе соединения достаточно одному приемнику выйти из строя, чтобы прекратилась работа остальных. Во избежание этого иногда применяют термосопротивления.

Для простоты рассмотрим схему, состоящую из четырех последовательно соединенных друг с другом ламп накаливания ($Л_1$—$Л_4$). Параллельно каждой лампе подключается термосопротивление с достаточно большим омическим сопротивлением (фиг. 46). При прохождении тока в цепи через каждое термосопротивление будет течь весьма малый ток, так как сопротивление лампы значительно меньше со-

противления термистора. При протекании же небольшого по величине тока в термисторе будет выделяться малое количество тепла, рассеивающееся в окружающей атмосфере. Вследствие этого температура термистора не будет повышаться. Допустим теперь, что какая-нибудь из ламп (например, $Л_2$) перегорела. В первый момент падение напряжения в основном сосредоточится на термисторе TR_2, подключенном к перегоревшей лампе, и через него пойдет более сильный ток, который начнет разогревать термосопротивление. Одновременно с постепенным разогревом термистора начнет увеличиваться сила идущего через него тока до тех пор, пока сила тока через цепь ламп не достигнет примерно своего прежнего значения и лампы снова будут ярко гореть.

Для хорошей работы описанного устройства необходимо лишь подобрать соответствующие параметры подключаемых термосопротивлений.

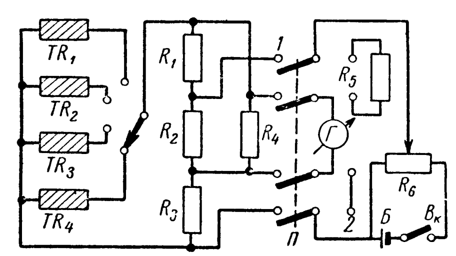
Фиг. 47. Термосопротивление в схеме стабилизатора напряжения.

Стабилизатор напряжения. Принцип действия стабилизатора напряжения, основанного на применении термосопротивления, понятен из фиг. 47. Последовательно с сопротивлениями R_1 и R_2 включается термистор TR. Нагрузка $R_н$ подключается параллельно сопротивлению R_2 и термистору. При увеличении напряжения в сети увеличится сила тока, идущего через термистор, что в свою очередь вызовет повышение его температуры и уменьшение его сопротивления. Это приведет к перераспределению напряжения между сопротивлениями R_1 и R_2 и термистором. При уменьшении напряжения в сети ток, протекающий через термистор, уменьшится, а следовательно, уменьшится его температура и возрастет сопротивление. Все это также приведет к перераспределению падения напряжения между R_1, R_2 и термистором. Параметры последнего подбираются таким образом, чтобы на зажимах нагрузки напряжение всегда оставалось практически неизменным. В этом случае термистор должен иметь минимальную тепловую инерцию.

Измеритель температуры. Большое распространение получили термисторы для измерения температур. Принципиальная схема одного из подобных устройств весьма проста. В одно из плеч моста включается термосопротивление, при помощи которого производится измерение температуры. Гальванометр моста обычно градуируется непосред-

ственно в градусах. При изменении температуры будет нарушаться равновесие моста и стрелка гальванометра будет отклоняться в соответствующую сторону, указывая число градусов. В связи с тем что омическое сопротивление термистора может быть достаточно большим, можно пренебречь сопротивлением проводов и измерять температуру на расстоянии сотен метров от измерительного прибора.

Применяя подобный принцип, можно с большой степенью точности измерять температуры воздуха на больших высотах, температуру воды и почвы на больших глубинах, производить дистанционный контроль температуры в ряде случаев. Пользуясь одним измерительным прибором, можно измерять температуры в разных местах. На фиг. 48 изображена принципиальная схема подобного устройства. Сам прибор находится в контрольном пункте, в то время как термосопротивления (TR_1, TR_2, TR_3 и т. д.) находятся в контакте с разными объектами, температура которых измеряется.



Фиг. 48. Схема прибора для дистанционного измерения температур.

Для проверки градуировки четырехполюсный переключатель *П* перебрасывается из положения *1* в положение *2*.

Весьма показательно, что чувствительность описываемого метода в принципе может быть очень большой. Применяя гальванометр с чувствительностью в $2 \cdot 10^{-10}$ *а/мм*, можно определять изменение температуры на 0,0005° С. Никакой другой термометр не может претендовать на такую точность. Столь высокая чувствительность метода позволяет применять его для внутривенной термометрии и для других еще более тонких измерений.

Регулятор температуры. Для автоматического регулирования температуры с помощью термосопротивления его помещают в термостате, в котором должно поддерживаться постоянство температуры, и включают в цепь чувствительного электромагнитного реле. При повышении температуры реле срабатывает и разрывает цепь накала обмотки термостата. Когда температура понизится до нормы, реле снова включает питание термостата.

Болометры. Болометр — это прибор, с помощью которого можно с большой степенью точности измерить энергию излучения. В основу болометров большинства конструкций положен принцип превращения лучистой энергии в тепловую энергию. С открытием электрических свойств полупроводников последние были использованы для болометрической техники и повысили предел чувствительности болометра до 10^{-10} *вт.*

Насколько высока чувствительность современных болометрических схем, можно судить хотя бы по следующему примеру.

С помощью прецезионного болометра, помещенного в фокусе телескопа, и усилителя можно зафиксировать отраженные от луны теплювые лучи. С этой точки зрения становится понятным широкое использование болометров для самых разнообразных целей. Исключительную ценность болометры представляют в тех случаях, когда нужно производить какие-либо спектрометрические исследования.

Принципиальная схема обычного болометра представляет собой мост, в одно плечо которого включается чувствительное термосопротивление. Когда на термосопротивление падает какое-либо тепловое излучение, оно повышает его температуру, вследствие чего нарушается равновесие моста и стрелка измерительного прибора, предварительно проградуированного в соответствующих единицах, отклонится на некоторое число делений. Термистор нередко помещается в металлический или стеклянный вакуумный баллон с окошком из какого-нибудь прозрачного материала. На наружную часть баллона выводятся отводы от термистора для его включения в схему.

Вакуумметр. Существует много разновидностей приборов, измеряющих степень разреженности воздуха в откачиваемом объеме, так называемых вакуумметров. Среди них есть и такие, принцип действия которых основан на применении термистора. В небольшую стеклянную трубку впаян термистор нитевидной формы. Эта трубка, получившая название манометрической лампы, присоединяется к откачиваемому объему. Затем термистор включается в схему моста, образуя одно из его плеч. Во второе плечо включается так называемая балластная лампа такой же конструкции, но предварительно откачанная до высокого вакуума и отпаянная. Третье плечо представляет собой постоянное сопротивление, а четвертое — переменное, величину которого можно регулировать поворотом ручки.

Мост сбалансирован в том случае, когда в откачиваемом объеме высокий вакуум. По мере ухудшения вакуума мост все сильнее и сильнее разбалансировывается и стрелка гальванометра все дальше уходит от своего первоначального положения. А так как гальванометр проградуирован прямо в миллиметрах ртутного столба, то стрелка прибора показывает давление в откачиваемом объеме.

Разбалансировывание моста при изменении вакуума происходит потому, что теплопроводность газа в определенных границах зависит от давления. По мере уменьшения давления теплопроводность газа уменьшается. Когда мост включен, через термистор идет ток. Термистор нагревается и выделяет тепло в окружающее пространство. Чем ниже давление газа в лампе, тем хуже теплопроводность и, следовательно, тем меньшее количество тепла будет передано термистором в окружающее пространство. Таким образом, от величины давления будет зависеть потеря тепла термистором, а стало быть, и его температура. С изменением же температуры термистора меняется величина его омического сопротивления, что резко сказывается на равновесии моста. Сила тока, идущего через термистор, во все время работы вакуумметра поддерживается постоянной при помощи реостата.

С помощью такого вакуумметра можно надежно измерять давления в пределах от 1 до 10^{-3} *мм* рт. ст. При давлениях, превышающих 1 *мм* рт. ст., теплопроводность газа в лампе практически перестает зависеть от давления.

Термистор, помещенный в манометрическую лампу вакуумметра, должен обладать минимальной инерционностью.

Другие применения термосопротивлений. При помощи схем с термосопротивлениями можно измерять скорости потоков жидких и газовых сред, компенсировать температурные изменения сопротивлений цепей, измерять мощности различных электрических линий. Термосопротивления успешно используются в приборах, предназначенных для измерения уровня жидкости, теплопроводности, а также в устройствах, регулирующих напряжение, громкость и другие величины.

Термисторы применяются для автоматического регулирования амплитуды генератора и автоматического регулирования усиления в усилителе. Большое распространение получили термисторные схемы — ограничители, предназначенные для ограничения верхнего предела какой-нибудь фи-

зической величины: тока, напряжения, громкости звука и т. д.

Существуют особые типы газоанализаторов, принцип действия которых основан на использовании термосопротивлений.

ГЛАВА ШЕСТАЯ

ТЕРМОЭЛЕКТРОГЕНЕРАТОР ТГК-3

В 1953 г. были выпущены первые в мире полупроводниковые термоэлектрогенераторы ТГК-3, непосредственно превращающие тепловую энергию керосиновой 20-линейной лампы «Молния» в электрическую. ТГК-3, что означает термоэлектрогенератор керосиновый трехваттный, создан под руководством академика А. Ф. Иоффе ленинградским коллективом научных работников и предназначен для питания батарейных приемников «Родина-47», «Родина-52», «Искра», «Б-2» и им подобных.

Принцип устройства термоэлектрогенератора основан на использовании термоэлектрического эффекта, физическая природа которого была рассмотрена в первой главе. Там же было показано, что если составить цепь из двух полупроводников — электронного и дырочного, то коэффициент термоэлектродвижущей силы пара α_0 будет равен сумме коэффициентов α_- и α_+, а полная термоэлектродвижущая сила, возникающая на концах такой пары, будет равняться

$$\varepsilon = \alpha_0 (T_2 - T_1) = (\alpha_- + \alpha_+)(T_2 - T_1).$$

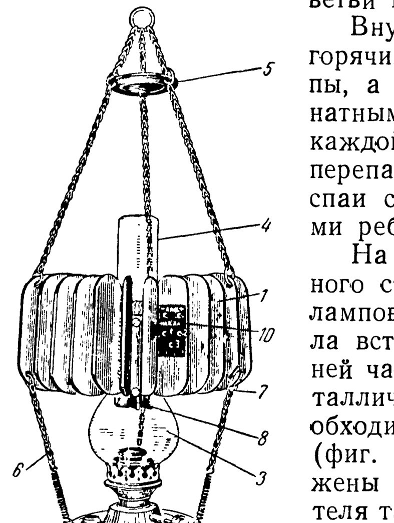
Отсюда следует, что, соединяя „пары“ друг с другом последовательно, можно при той же самой разности температур получить большее значение полной термоэлектродвижущей силы ε_n, которая в этом случае будет равна

$$\varepsilon_n = \alpha_0 n (T_2 - T_1),$$

где n — число пар.

С другой стороны, соединяя «пары» друг с другом параллельно, можно при той же самой разности температур получить в n раз более сильный ток, где n — число параллельно соединенных пар. На этом принципе и построен термоэлектрогенератор ТГК-3. Несколько пар, соединенных друг с другом последовательно, образуют одну термобата-

рею, предназначенную для питания накальных цепей. Другие пары, соединенные последовательно, образуют вторую термобатарею, предназначенную для питания через вибропреобразователь анодных и сеточных цепей радиоприемника. В ТГК-3 «пара» состоит из одной полупроводниковой ветви и одной металлической.



Фиг. 49. Внешний вид термоэлектрогенератора ТГК-3.

1 — термоголовка; *2* — керосиновая лампа; *3* — ламповое ст кло; *4* — металлическая труба; *5* — подвесное устройство для термоголовки; *6* — подвесное устройство для керосиновой лампы; *7* — съемная цепочка; *8* — нагреватель; *9* — подвесное кольцо; *10*—колодка с зажимами.

Внутренние спаи нагреваются горячими газами керосиновой лампы, а наружные охлаждаются комнатным воздухом. Для создания на каждой ветви возможно большего перепада температуры наружные спаи соединены с 28 металлическими ребрами радиатора.

На горелку лампы вместо обычного стекла надевается укороченное ламповое стекло. В отверстие стекла вставляется нагреватель, в верхней части которого расположена металлическая труба, создающая необходимую для горения лампы тягу (фиг. 49). Термоэлементы расположены по радиусам вокруг нагревателя так, что их наружные спаи примыкают к ребрам радиатора, а внутренние—к горячей стенке нагревателя. При таком конструктивном решении горящая керосиновая лампа выполняет одновременно две функции: освещает помещение и нагревает термоэлектрогенератор. При нормальном горении лампы температура внутренних спаев термоэлементов доходит примерно до 380° С, в то время как температура наружных спаев не превышает 70—80° С, что обеспечивает достаточную для указанной цели термоэлектродвижущую силу.

Выводные концы от двух термобатарей подведены к пяти зажимам колодки. Два зажима предназначены для подключения к ним вибропреобразователя, а остальные три — для подключения накальных цепей радиоприемника.

Термоэлектрогенератор ТГК-3 имеет следующие основные технические данные, приводимые в заводском описании:

1. Батарея накала: а) для приемника «Родина-47» — 2±10% *в* при токе 0,5 *а*; б) для приемника «Родина-52»— 1—1,4 *в* при токе 0,52 *а*; в) для приемника «Искра» и «Б-2» — 1—1,4 *в* при токе 0,3 *а*.

2. Батарея анода после вибропреобразователя: а) для приемника «Родина-47» — 120±10% *в* при токе 8 *ма*; б) для приемника «Родина-52»—90±10% *в* при токе 11 *ма*; в) для приемника «Искра» и «Б-2»—90±10% *в* при токе 11 *ма*.

3. Напряжение смещения для приемника «Родина-52» и «Искра»—9±10% *в*.

Как следует из описания ТГК-3, он питает различные типы приемников, требующих различные токи для накальных цепей и различные анодные напряжения. Подобная универсальность достигается двумя способами. Разные значения накальных токов осуществляются благодаря тому, что от батареи делаются соответствующие отводы, вполне обеспечивающие набор нужных значений сил токов. Разные значения анодных напряжений легко достигаются вследствие того, что ТГК-3 имеет падающую вольтамперную характеристику. Поэтому при увеличении анодного тока соответственно понижается анодное напряжение, и наоборот.

Термоэлектрогенератор ТГК-3 вместе с подвесным устройством имеет высоту 1 000 *мм*, а диаметр — 300 *мм*. Его вес без вибропреобразователя составляет 8 *кг*. Вибропреобразователь с соединительными шнурами весит 3 *кг* и имеет размеры 189×132 *мм*. При расходе горючего 60—70 *г* в час однократного запаса керосина в лампе хватает примерно на 8 час. беспрерывной ее работы.

В настоящее время разрабатывается вторая модель генератора, обеспечивающая питание накальных, анодных и сеточных цепей без вибропреобразователя. Необходимое напряжение, как низкое, так и высокое, будет давать сам генератор.

ГЛАВА СЕДЬМАЯ

ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛУЧЕНИЕ ХОЛОДА И ТЕПЛА

Получение холода на основе явления Пельтье может быть достигнуто лишь при помощи полупроводников.

Это явление получило первое практическое применение в домашних термоэлектрических холодильниках. Устройство термоэлектрического холодильника, или, иначе говоря,

криостата, принципиально мало отличается от устройства термоэлектрогенератора. Так же как и для термоэлектрогенератора, здесь необходимы такие материалы, которые обладают максимальными значениями электропроводности и коэффициента термо-э. д. с. и минимальным значением коэффициента теплопроводности. Из таких материалов изготовляют и собирают термостолбики. В столбике все элементы соединяются друг с другом последовательно таким образом, чтобы электронный элемент контактировал с дырочным, дырочный со следующим электронным и т. д. Столбики могут соединяться друг с другом параллельно. Все охлаждающиеся спаи размещаются во внутреннем пространстве холодильного шкафа. Нагревающиеся спаи соединяются с металлическими ребрами-охладителями. Когда через всю эту систему идет ток нужного направления, внутренние спаи охлаждаются, а наружные нагреваются. Так как ребра предназначены специально для рассеивания тепла в окружающий воздух, то при рациональном конструктивном решении наружные спаи могут иметь постоянную температуру, несколько превышающую температуру помещения. Таким образом, когда от наружных спаев непрерывно отводится теплота и они находятся при некоторой температуре T_1, внутренние спаи в этом случае будут иметь более низкую температуру T_2. Подбирая соответствующим образом параметры термоэлектрических ветвей холодильника, можно добиться значительного понижения температуры внутренних спаев.

Термоэлектрические холодильники обладают рядом неоценимых преимуществ, главным из которых является большой срок их службы, так как термоэлектрический холодильник при нормальном режиме эксплуатации не подвергается порче. При рациональном подборе параметров полупроводниковых ветвей к. п. д. холодильника может быть достаточно высок.

Явление Пельтье может быть использовано и для обогрева помещения за счет тепловой энергии наружного воздуха. Для этого в термоэлектрической системе надо переменить направление электрического тока. Тогда внутренние спаи будут нагреваться, а наружные — охлаждаться. Разумеется, что для этой цели нужен агрегат соответствующей конструкции.

Рассмотрим цепь, составленную из трех полупроводниковых образцов: электронного, „дырочного“ и электронного. При некотором направлении тока температура пер-

вого спая будет T_1, а второго — T_2. Пусть $T_1 > T_2$. При прохождении тока в этой системе в первом спае выделяется некоторое количество тепловой энергии Q_1, а от второго спая отнимается некоторое количество тепловой энергии Q_2; энергии Q_1 и Q_2 не равны друг другу. Это неравенство обусловливается тем, что теплота Пельтье пропорциональна абсолютной температуре спая. Поэтому $Q_1 > Q_2$. Следовательно, в горячем спае выделяется больше энергии на величину $P = Q_1 - Q_2$, чем отнимается от холодного спая. Этот избыток энергии P возникает за счет электрической энергии тока.

Можно показать, что

$$\frac{P}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}.$$

Пусть, например, температура горячего спая $T_1 = 290°$ К*, а температура холодного спая $T_2 = 260°$ К. Тогда $\frac{P}{Q_1} \approx \frac{1}{10}$. Это означает, что при температуре помещения 17°С (290° К) всего лишь одна десятая часть тепловой энергии, выделяемая на спае, будет доставляться за счет электрического тока, в то время как девять десятых энергии будет черпаться из запасов наружного холодного воздуха. Из этих расчетов следует, что термоэлектрический обогрев помещения является экономически выгодной системой. В эти расчеты нужно внести существенную поправку, так как они основывались на допущении, что все физические явления в термоэлектрическом нагревателе обратимы. На самом же деле этот процесс сопровождается необратимыми потерями. Но даже с учетом необратимых потерь термоэлектрический нагреватель представляет несомненный интерес.

ГЛАВА ВОСЬМАЯ

АТОМНАЯ БАТАРЕЯ

Такое громкое и многообещающее название принадлежит небольшому прибору, конструкция которого весьма близка к конструкции фотоэлемента с запирающим слоем. Атомная батарея — одно из последних изобретений в области полупроводниковой электроники. Публикации о ней стали появ-

---

* Через ° К обозначаются градусы Кельвина по абсолютной шкале температур.

ляться в периодической научной печати в 1954 г. Атомная батарея — прибор, создающий электрическую энергию за счет излучения одного из радиоактивных элементов, в частности радиоактивного стронция.

Стронций — элемент, расположенный во II группе периодической системы Менделеева. Его порядковый номер 38, а атомный вес 87,63. Распространенность стронция в природе невелика и составляет всего 0,008% от общего числа атомов земной коры. Обычно стронций встречается не в виде свободного элемента, а в виде сульфата или карбоната, образуя соединения $SrSO_4$ и $SrCO_3$. Оба соединения — минералы. Минерал с формулой $SrSO_4$ называется целестин, а $SrCO_3$ — стронцианит.

Стронций плавится при температуре 770° С. Его удельный вес 2,6 *г/см*³. Так же как и его соседи по группе — кальций и барий, стронций весьма активен, довольно быстро окисляется на воздухе, соединяется со многими элементами, а также взаимодействует с водой. Такой «обычный» стронций никакими радиоактивными свойствами не обладает. Как и многие другие элементы периодической системы, стронций имеет несколько изотопов. Напомним, что изотопами называют химические элементы, обладающие практически тождественными химическими свойствами, но отличающиеся друг от друга атомными весами. Почти каждый элемент периодической системы имеет свои изотопы. Например, магний, находящийся во II группе периодической системы и обладающий атомным весом 24,32, имеет три изотопа: один из них с атомным весом 23,99, другой — 24,99 и последний—25,99. Элемент VIII группы никель имеет пять изотопов с соответствующими атомными весами: 57,96; 59,95; 60,95; 61,95; 63,95. Ртуть имеет семь изотопов, олово — 10 и т. д. Еще большее число изотопов имеют радиоактивные элементы, в том числе, конечно, и искусственно-радиоактивные, у которых радиоактивность возникает после специальной обработки стабильных ядер.

В ряду искусственно-радиоактивных элементов находится и стронций, имеющий 10 изотопов. Один из этих изотопов, имеющий атомный вес 90, т. е. стронций-90, в процессе радиоактивного распада испускает β-излучение, т. е. электроны. Характерно и чрезвычайно важно, что излучаемые стронцием-90 электроны обладают большими скоростями, т. е. высокими значениями кинетических энергий. Кроме того, существенное значение имеет и период полураспада

стронция-90, равный 25 годам, в течение которого лишь половина первоначального количества стронция подвергается радиоактивному распаду.

Подобные свойства стронция-90 и позволили применить его в атомной батарее.

Рассмотрим устройство этой батареи.

На небольшой пластинке из монокристалла кремния, хорошо сконтактированной с металлическим электродом, с помощью специальной обработки получают в одной части монокристалла электронный кремний, а в другой — «дырочный». В результате получаются три слоя, следующих в таком порядке: «дырочный» кремний, электронный кремний; металлический электрод. Контакт «дырочной» части монокристалла с электронной, т. е. *p—n*-переход, приводит к образованию запорного слоя. Нетрудно заметить, что конструкция описываемого прибора принципиально пока ничем не отличается от конструкции вентильных фотоэлементов и, в частности, «солнечной» батареи. Однако в конструкции атомной батареи есть особенность, отличающая ее от вентильного фотоэлемента. Эта особенность заключается в том, что на свободную поверхность кремниевого монокристалла наносится тонкий слой радиоактивного стронция-90, а поверх него — контактный электрод, служащий выводом. Испускаемые стронцием электроны проникают в толщу кремниевой пластинки и вызывают в ней появление электронов проводимости. Каждый бомбардирующий электрон создает в кремнии 200 000 вторичных электронов проводимости меньших энергий, которые диффундируют к одному из электродов. В результате этого между обоими электродами создается разность потенциалов, достигающая 0,2 *в*. Ток короткого замыкания кремниевого элемента площадью 0,32 *см*^{2} равен 5 *мка*, к. п. д. батареи 1%. Однако есть основание полагать, что к. п. д. может быть значительно повышен. Благодаря длительности периода полураспада стронция-90 срок службы батареи исчисляется, по крайней мере, 20 годами.

Несколько кремниевых пластинок, соединенных друг с другом последовательно и параллельно, образуют батарею, которая с успехом может быть использована для питания маломощной радиотехнической аппаратуры и других электронных приборов, построенных, например, на полупроводниковых диодах и триодах.

Нетрудно заметить, что природа явлений в атомной батарее аналогична явлениям, происходящим в любом вен-

тильном фотоэлементе. Отличие фотоэлемента от атомной батареи состоит в том, что в первом случае полупроводник облучается фотонами, а во втором — электронами.

После того как к. п. д. атомной батареи будет повышен, границы возможных областей ее применения значительно расширятся.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основная тема настоящей брошюры не исчерпана полностью, так как роль и место полупроводников значительнее. Напомним читателю, что сложные катоды радиоламп изготовляются из полупроводниковых веществ.

Для защиты электрических высоковольтных линий от перенапряжения, вызванных, например, грозовыми разрядами, применяются полупроводниковые грозовые разрядники.

Для измерения напряжений и деформаций служат полупроводниковые тензометры, представляющие собой объемные омические сопротивления, заключенные между двумя электродами. При изменении нагрузки на тензометр изменяется его сопротивление.

В последние годы в ядерной технике с успехом применяются полупроводниковые счетчики для счета элементарных частиц. Широкое применение в технике находят так называемые сегнетоэлектрики — полупроводниковые соединения с высоким значением величины диэлектрической постоянной, доходящей в некоторых веществах до нескольких тысяч. Открытие советским физиком Б. М. Вулом сегнетоэлектрических свойств титаната бария ($BaTiO_3$) с температурой Кюри, лежащей выше 100° С, значительно расширило возможности сегнетоэлектриков, используемых для изготовления конденсаторов.

Еще большее значение за последние годы получили главным образом в радиотехнике ферромагнитные полупроводниковые материалы — ферриты. Благодаря своим свойствам ферриты могут с успехом заменить в ряде случаев применяющиеся в настоящее время другие ферромагнитные материалы, в частности сталь. Рассмотрим, что происходит с ферромагнетиком, когда он попадает во внешнее магнитное поле.

Ферромагнетизм некоторых металлов и сплавов современная физика объясняет тем, что в ферромагнетике существует огромное число микроскопических по размерам областей, каждая из которых намагничена и имеет некоторый

магнитный момент, ориентированный в пространстве. Выше температуры Кюри самопроизвольное намагничивание разрушается. Линейные размеры такой области у мягкого железа порядка 10^{-4} *см*. Если внешнее магнитное поле отсутствует, то магнитные моменты областей произвольного намагничения имеют беспорядочную ориентацию. Когда ферромагнетик попадает во внешнее магнитное поле, последнее стремится ориентировать эти области таким образом, чтобы их магнитные моменты оказались направленными вдоль внешнего поля. С повышением температуры, когда тепловое движение возрастает, внешнему магнитному полю становится труднее упорядочить магнитные моменты областей, и, наоборот, с понижением температуры этот процесс облегчается.

При намагничении ферромагнетиков повороты областей произвольного намагничивания сопровождаются своеобразным «трением». Поэтому когда ферромагнитный металл находится во внешнем переменном магнитном поле, он заметно нагревается, что приводит к бесполезной трате энергии. Нагрев ферромагнитного металла вызывается также индукционными токами Фуко. Величина токов Фуко тем больше, чем больше электропроводность металла и чем выше частота переменного магнитного поля. Напомним, что именно это обстоятельство и положено в основу устройства индукционных высокочастотных печей.

Если сердечник трансформатора выполнить в виде целого куска железа, то во время работы трансформатора сердечник будет сильно нагреваться.

Существует несколько способов борьбы с паразитными токами Фуко. Один из самых распространенных способов заключается в том, что сердечники трансформаторов изготовляются из сравнительно тонких изолированных друг от друга листов железа. Другой способ основан на применении сердечника из магнитодиэлектрика, т. е. из прессованного железного порошка, смешанного предварительно с изолирующей массой.

Однако эти способы нерациональны при высоких частотах, используемых в радиотехнике. Поэтому при высоких частотах нашли широкое применение полупроводниковые ферромагнитные материалы — ферриты. Оказалось, что среди полупроводников находятся вещества, обладающие весьма малой удельной электропроводностью и высокими магнитными свойствами. В ферритном трансформаторном сердечнике, обладающем большим омическим сопротивле-

нием, бесполезные потери, связанные с токами Фуко, весьма малы.

О роли, значении и перспективах развития полупроводников очень ярко рассказал в своей новогодней речи по радио, произнесенной 1 января 1955 г., акад. А. Ф. Иоффе:

«Величайшие достижения техники вырастают из открытий физики. Так, радио Попова явилось следствием теории электромагнитных волн; электрические машины вытекли из открытия электромагнитной индукции; телевидение — из физической электроники; ядерная энергия — из физики атомного ядра.

В физике сегодняшнего дня заложены ростки завтрашней техники.

Современная физика знает две области, от которых мы ждем наиболее крупных сдвигов в материальных условиях жизни, — это атомное ядро и полупроводники. Попробуем же приоткрыть уголок завесы, скрывающей будущее полупроводников.

25 лет тому назад полупроводники впервые вошли в электротехнику наряду с металлами. Тогда, на заре первой пятилетки я высказал предположение, что термоэлементы и фотоэлементы из полупроводников способны будут превращать 3—4% тепловой и солнечной энергии непосредственно в электрическую и что социалистическая система народного хозяйства создаст необходимые условия для их разработки.

Многим это тогда казалось фантастикой. Даже некоторые газеты высказывались скептически. Сейчас эти ожидания уже превзойдены практикой и мне хотелось бы наметить дальнейший этап проникновения полупроводников в наш быт и народное хозяйство. Его реальность обеспечивается бурным ростом наших сил на пути к коммунизму.

Перешагнем мысленно несколько лет или даже одно-два десятилетия и мы увидим, что полупроводниковые термоэлементы снабжают промышленность электроэнергией, полученной без посредства машин — непосредственно из тепла топки.

Центральное отопление наших зданий будет давать в качестве бесплатного приложения электроэнергию в таких количествах, которые вызовут полную электрификацию всех бытовых нужд.

А дальше центральное отопление уступит место термоэлектрическим батареям, которые будут подавать теплый

воздух зимой и холодный летом, автоматически поддерживая температуру в помещениях на желательном уровне.

Все виды транспорта — железнодорожного, автомобильного, водного, а может быть и авиация перейдут на электроэнергию, получаемую от термоэлементов.

Идея Менделеева о подземной газификации найдет свое естественное решение в термоэлементах.

Те же полупроводниковые термоэлементы будут создавать холод в домашних холодильниках, при транспорте и хранении скоропортящихся продуктов.

Везде и всюду, где имеются в природе или в производстве источники тепла, они будут производить электроэнергию. Везде, где есть электроэнергия, можно создавать тепло или холод, осуществлять любые производственные процессы. Наступит эпоха полной электрификации в городах и селах. Производство электроэнергии не потребует больше сложных и дорогих машин.

Основной источник всех видов энергии на земле — это солнечные лучи. Но каким сложным и несовершенным путем достается нам эта энергия.

С помощью солнечных лучей растения присоединяют углекислоту из воздуха и почвы. Но едва 1% солнечной энергии сохраняется в процессе фотосинтеза в дровах, в каменном угле, торфе, нефти. Нужно 50 лет дереву, миллионы лет каменному углю и тысячи лет торфу, прежде чем они смогут дать нашим заводам тепло, которое в топках паровых котлов переходит в энергию пара, потом превращается в механическую энергию вращающихся турбин и, наконец, в электроэнергию.

Полупроводники могут извлечь из солнечных лучей в 10—20 раз больше энергии, чем растения, и доставлять ее сразу в виде электрического тока. Если удастся покрыть хотя бы тысячу гектар южных пустынь фотоэлементами или термоэлементами, мы будем получать изо дня в день по миллиону киловатт — больше, чем дает Днепрогэс. А таких непригодных для земледелия площадей на юге миллионы гектар.

При использовании ядерной энергии в качестве отходов производства остаются радиоактивные продукты, которые годами испускают разнообразные лучи. Полупроводники позволяют превращать энергию этих лучей в электроэнергию.

Ящик размером в один метр сможет годами снабжать

энергией для освещения, для моторов, для зарядки аккумуляторов, для радиотехники.

С помощью полупроводников можно в сотни раз сократить размеры всех радиотехнических деталей, в том числе и радиоламп, которые заменятся и уже заменяются полупроводниковыми приборами. Такой прибор-камешек размером в несколько миллиметров выпрямляет переменный ток, усиливает и возбуждает радиоволны. Он потребляет в 10 раз меньше электроэнергии. Многоламповый приемник можно разместить в футляре ручных часов.

Полупроводниковые радиостанции и фотоэлементы позволяют управлять на расстоянии движением всех видов транспорта, любым самым сложным производственным процессом, почти мгновенно предотвращать опасные последствия аварий и нарушений технологического процесса.

Полупроводники уже сейчас осуществляют контроль и всестороннюю автоматизацию в ряде производств. В дальнейшем они разгрузят рабочих от самых утомительных и быстротекущих операций и сделают рабочего управляющим, наблюдающим и контролирующим производство.

Автоматическая запись всех сторон работы машин и орудий в промышленности и сельском хозяйстве, регистрация условий, в которых протекает работа, охватят все виды деятельности человека.

А какие перспективы научного исследования открывают полупроводники: тончайшие явления в отдельных молекулах, счет электронов и ядерных частиц, процессы, длящиеся миллионные доли секунды, — все это становится доступным исследователю. Наука, оснащенная такими орудиями, глубже проникнет в тайны природы и откроет еще неведомые нам средства технического прогресса, которые оставят далеко позади современный передовой фронт — полупроводники».

Во всех этих словах выдающегося ученого нашей страны многое еще кажется фантазией, однако уже современный уровень науки и техники с полным основанием позволяет говорить о колоссальных перспективах полупроводниковой электроники, так как самый трезвый и осторожный анализ, основанный на уже существующих достижениях, позволяет твердо надеяться на быстрый прогресс наших дальнейших познаний о полупроводниках.

ЛИТЕРАТУРА

А. Ф. Иоффе, Полупроводники, Изд. АН СССР, 1955.

Н. Я. Пумпер, Кристаллические диоды и триоды, Госэнергоиздат, 1953

А. Я Федотов, Кристаллические триоды, Госэнергоиздат, 1955.

Г. Хениш, Полупроводниковые выпрямители, ИЛ, 1951.

В. Г. Комар, Работа полупроводниковых выпрямителей в цепях управления, Госэнергоиздат, 1952.

В. Г. Комар, Селеновые выпрямители, „Электричество", 1947, № 2. Полупроводниковые электронные приборы (сборник переводов под редакцией А. В. Русанова), ИЛ, 1953.

В. С. Вавилов, Усиление токов высокой частоты кристаллическими германиевыми триодами, „Успехи физических наук", 1950, т. 40, вып. 1.

Б. Т. Коломиец, Фотосопротивления, Изд. „Знание", 1954.

Н. О. Чечик, Фотоэлементы и их применения, Госэнергоиздат, 1955.

СОДЕРЖАНИЕ

Цена 3 р. 05 к.